Avances en Ingeniería Mecánica

IX CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA

28, 29 Y 30 DE NOVIEMBRE DE 2018
PAMPLONA, COLOMBIA

Organizadores :

Patrocinadores :

ISBN: 978-958-56670-8-2

Gonzalo Guillermo Moreno Contreras
Elkin Gregorio Flórez Serrano
Albert Miyer Suarez Castrillón
Rafael Bolívar León
Luz Karime Hernández Gegen
Simón Figueroa Salgado
Bladimir Ramón Valencia
Juan Carlos Serrano Rico
Editores

Universidad de Pamplona
Programa de Ingeniería Mecánica
Grupo de Investigación de Ingeniería Mecánica Universidad de Pamplona GIMUP

Avances en Ingeniería Mecánica

Memorias IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica

Pamplona, Colombia
28-30 noviembre 2018

ISBN: 978-958-56670-8-2

Presentación

El IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica, IX COLIM – hasta el 2014 Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica (COBIM)- es un evento bienal que por segunda vez organiza el Programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad de Pamplona.

El éxito obtenido en el logro de los objetivos propuestos con la realización del anterior congreso, motivó a los organizadores a celebrar de nuevo, este certamen internacional que reunirá en un ambiente de sano intercambio, los investigadores y profesionales de esta rama pertenecientes a universidades y empresas de los países latinoamericanos, para promover profesionalmente los lazos fraternos que históricamente han existido entre estos. Por esta razón en el último congreso realizado en Cuenca (Ecuador), se solicitó formalmente a la Asamblea de la Sociedad Bolivariana de Ingeniería Mecánica (SOBIM) y le fue concedida, la sede del evento que esperamos sea exitoso en sus logros y trascendencia.

Los frecuentes contactos e intercambios de ideas entre investigadores, favorecen su productividad en proporción directa al número de investigadores implicados. Estos contactos pueden ser espontáneos, bilaterales y de pequeños grupos, o consistir en reuniones organizadas. Aunque ambos son efectivos, lo son más los segundos. De manera que es conveniente establecer las condiciones para que cada investigador conozca las actividades de sus pares, junto con sus logros y problemas, para que se cree un ambiente de compañerismo y mutua ayuda que termine con el individualismo, vicio tan frecuente entre nuestros investigadores, y la repugnancia a compartir con otros la exploración de un área científica.

Estos son los objetivos que se pretenden conseguir con este encuentro latinoamericano y su logro constituirá la deseada retribución al esfuerzo que implica la organización y realización de un evento de esta naturaleza.

Desde la acogedora ciudad de Pamplona, en la frontera colombo-venezolana, que será la sede del congreso, les damos desde ya, tanto a los participantes nacionales como internacionales, un abrazo de cordial bienvenida.

Comité Organizador IX COLIM 2018

Organizadores

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de noviembre de 2018. Universidad de Pamplona
Programa Ingeniería Mecánica
Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica Universidad de Pamplona GIMUP

Comité Organizador

Coordinador general
Dr. Simón Fygueroa Salgado

Director Ejecutivo
Dr. Elkin Flórez

Comité de Promoción y Logística Informática
M.Sc. Edison Martínez Oviedo
M.Sc. William Mora Espinoza

Comité Revisor
Dra. Luz K. Hernández Gegen
Dr. Juan C. Serrano Rico
Dr. Bladimir Ramón Valencia

Comité de Eventos
Dr. Albert Suarez
M.Sc. Maite Velasco
Ing. Brayan Conde

Comité de Finanzas
Dr. Gonzalo Moreno
Dr. Rafael Bolívar

Comité de Logística Física
M.Sc. José Manuel Ramírez
M.Sc. Elkin Mora
M.Sc. Holger Cácua

Comisión Científica
Dr. Gonzalo Moreno. (Colombia).
Director Científico
Dr. Simón Fygueroa. (Colombia).
Dr. Elkin Flórez. (Colombia).
Dra. Luz K. Hernández. (Colombia).
Dr. Bladimir Ramón. (Colombia).
Dr. Rafael Bolívar. (Colombia).
Dr. Juan C. Serrano. (Colombia).
Dr. Marco Ceccarelli. (Italia).
Dr. Magín Lapuerta. (España)
Dr. Rene Vinicio Sánchez. (Ecuador).
Dr. José Félix Vázquez. (México).
Dra. Lisa Lugo (Paraguay).
Dr. José Ignacio Huertas (México).
Dr. Eduardo Donnet (Argentina).
Dra. Angélica Noemí Arenas (Argentina).
Dr. Jorge Rodríguez. (Perú)
Dr. Mario Fernández. (Chile).
Dr. Grover Zurita. (Bolivia).
Dr. Antonio Vento Filo (Brasil).
Dr. Roberto Lemus (Chile).

Patrocinadores



TABLA DE CONTENIDO

PARTE A: Diseño Mecánico

RECONOCIMIENTO DE PERSONAS EN AMBIENTE CON EMISIONES DE HUMO USANDO SENSOR LASER Y REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES DESDE NUBE DE PUNTOS 3D. Parte 1.
Abraham E. Gamarra Moreno, José A. Dávalos Pinto

WEAR SIMULATION IN THE TOOL TURNING PROCESS.
Luz Karime Hernández Gegen, Edison Martínez Oviedo, Jonathan Javier Pabón Rojas

USO DE MSC ADAMS EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE MECÁNICA DE LAS VIBRACIONES.
Rodolfo Ponce Reynoso, Alba Nubia Tabares Arellano, Francisco León Acosta, Ricardo Tapia Herrera

A DISCUSSION ON CRACK GROWTH SIMULATION MODELS UNDER VARIABLE AMPLITUDE LOADING CONSIDERING THE RETARDATION.
Carlos Alexandre J. Miranda, Luiz Carlos H. Ricardo, Rosani M. L. da Penha

A REVIEW ON FATIGUE CRACK PROPAGATION IN THE THRESHOLD STRESS INTENSITY REGION CONSIDERING CRACK CLOSURE AND THE R-RATIO INFLUENCES
Carlos Alexandre J. Miranda, Luiz Carlos H. Ricardo, Luiz Felipe F. Ricardo, Rosani M. L. da Penha

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO BIOMECÁNICO DE LA EPÍFISIS FEMORAL EN NIÑOS DE 6 AÑOS AFECTADA POR NECROSIS AVASCULAR: MODELO COMPUTACIONAL
Andrés Fabián Mejía Rojas, Oscar Rodrigo López Vaca

ANÁLISIS DE RIESGO DE ACCIDENTALIDAD DE VEHICULOS PESADOS EN LA VÍA CÚCUTA – PAMPLONA
Adrián Ricardo Patiño Morantes, Gonzalo Guillermo Moreno Contreras, Bladimir Azdrúbal Ramón Valencia

SÍNTESIS ÓPTIMA DE UN MECANISMO DE THEO JANSEN
Neider Nadid Romero Núñez, Gonzalo Moreno Contreras, Elkin Flórez, Cesar Augusto Peña Cortes

EVALUACIÓN NO INVASIVA DEL DESARROLLO MUSCULAR DE DEPORTISTAS
Rosario Aldana Franco, Ervin Jesús Álvarez Sánchez, Andrés López Velázquez, Fernando Aldana Franco, José Gustavo Leyva Retureta, Eréndira Covix Gracia

EXPRO: EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR
Luis Miguel Méndez Moreno, Aída Daniela Becerra López, David Orlando Palencia Vergara, Juliana Orjuela García, Elizabeth Andres López Pérez

BANCO DE PRUEBAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA FRICCIÓN EN TRANSMISIONES TIPO POLEA-CABLE
Giovanni Torres Charry, MSc. Alejandro Salazar Vélez, Bernardo Andres Cardona Noreña, Juan Bernardo Gómez Mendoza

ESTUDIO COMPUTACIONAL DEL TIEMPO DE AUTOENCENDIDO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO EN IGNITION QUALITY TESTER (IQT)
Néstor Maldonado Mora, Juan Miguel Mantilla González

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUERZA DE RESISTENCIA AERODINÁMICA EN UNA OJIVA TIPO CLARK-Y
José Luis Méndez Orellana *, Luis Daniel Mendoza

ANÁLISIS 3D MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE FIJACIÓN DE PLACAS CRANEALES
Sergio Carvajal, Rodrigo López

CONTROL DE ACCIONAMIENTOS Y ENGRANAJES EN UNA CABINA DE SIMULACIÓN TÉRMICA, MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE NODERED
A. Ríos Duque, A. Sepúlveda Giraldo, N. Toro García, J. I. Cárdenas Jiménez

COMPORTAMIENTO BIOMECÁNICO DE LA UNIDAD DENTOALVEOLAR (UDA) DE UN INCISIVO CENTRAL BAJO UN TRATAMIENTO ORTODÓNTICO, UTILIZANDO ARCOS DE NiTi Y NiTiCu: SIMULACIÓN 3D MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS
Rodrigo López, Rafael Ortega, Diana Pacheco, Jimena Soler, Fernanda Pantoja, Fernanda Naranjo

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN PARA UNA CAPSULA ENDOSCÓPICA
Hernando González Acevedo, Juan Camilo Sabayé Prado

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO PARA UN MANIPULADOR PLANAR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD
Hernando Gonzales Acevedo, Daniel Felipe Rincón Ovalle

COMPARACIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y CORRIENTE PARA LA DETECCIÓN DE LA SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANAJES
David Chingal Imaicela, Vinicio Sánchez Loja, Diego Cabrera, Mariela Cerrada, Rafael Vásquez

ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y EMISIÓN ACÚSTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA
Edison Pacheco, Vinicio Sánchez Loja, Diego Cabrera, Mariela Cerrada

METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DEL SENSOR DE EMISIÓN ACÚSTICA EN UNA CAJA DE ENGRANAJES
Edison Pacheco, Vinicio Sánchez Loja, Diego Cabrera, Mariela Cerrada

DETECCIÓN DE FALLOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS MEDIANTE HISTOGRAMAS DE SEÑALES ACÚSTICAS
Julio Fernando Siguencia, Diego Cabrera, Vinicio Sánchez, Mariela Cerrada

DESARROLLO DE INGENIERÍA PARA DESCARGAR EL CLINKER EN EL NUEVO GALPON
Luis Orlando Cotaquispe Zevallos

DESARROLLO DE CHASIS DE UN VEHÍCULO DE TRACCIÓN HUMANA, A BASE DE GUADUA Y POLÍMERO
Juan Rodrigo Salamanca Sarmiento, Luis Fernando Acosta Joya, Fabián Leonardo Higuera Sánchez, Brayan Santiago Rojas Molina

ANÁLISIS TÉRMICO POR ELEMENTOS FINITOS DE FUSORES PARA IMPRESIÓN 3D POR FABRICACIÓN CON FILAMENTO FUNDIDO
Germán Andrés Gutiérrez Arias, Fernando Jiménez Díaz, Jorge Valcárcel Guzmán

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE ARCILLA PARA IMPRESIÓN 3D DE BAJO COSTO
Edwin Rúa Ramírez, Germán Gutiérrez Arias, Nelson Villamizar Cruz, Fernando Jiménez Díaz, Nicolás Pamplona

ANÁLISIS DE UN FLUJO TURBULENTO, CAPAZ DE PRODUCIR VIBRACIONES DENTRO DE UNA TUBERIA HORIZONTAL
Maite M. Velasco Chacón, Francisco M. León O

MODELADO Y SIMULACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN ECUADOR
Renato Fierro, Adrián Sigüenza R, Mary Vergara

PARTE B: Termofluidos y Energía

DISEÑO DEL ÁLABE DE UN AEROGENERADOR HORIZONTAL DE BAJA POTENCIA
Cristhian Leonardo Pabón Rojas, Elkin Flórez S. Juan Carlos Serrano Rico

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN LA CARACTERIZACIÓN DE UNA TORCHA HIDRÁULICA
Hernán Bolaños, Guillermo Angarita, Sylvain Richard, Francisco Botero

MODELAMIENTO Y EVALUCION DE UNA CONTRACCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO SÚBSONICO
Juan Javier Mora González, Edison Martínez Oviedo, Juan Carlos Serrano Rico

EXPERIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO, SEDE TUNJA, EN EL APROVECHAMIENTO DE LAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE
Carlos R. Batista-Rodríguez, Rosa I. Urquiza-Salgado

SIMULACIÓN MULTIDIMENSIONAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA DE IGNICIÓN POR COMPRESIÓN
Yesid Ortiz Sánchez, Elkin G Flórez Serrano

SIMULACIÓN DE UN ALABE DE AEROGENERADORPARA BAJAS POTENCIAS Y BAJAS VELOCIDADES
Brayan Y. Conde Pabón, Elkin G Flórez, Juan Carlos Serrano Rico

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE TRIGENERACIÓN-FOTOVOLTAICO INSTALADO EN UN CENTRO COMERCIAL
Aldo López Vega, Carlos Rubio-Maya, Víctor M. Ambriz Díaz, Hugo C. Gutiérrez Sánchez

ESTUDIO DE DIFERENTES MODELOS DE TURBULENCIA PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN PERFIL NACA 2415 MEDIANTE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE FLUIDOS
Luis. D. Mendoza, Luis E Vera

ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN HORNOS DE ALTA TEMPERATURA
Yefferson López Zuluaga, Alex M. García Vergara, Andrés A. Amell Arrieta

DESEMPEÑO DE UN HORNO DE CALENTAMIENTO LUEGO DE REPOTENCIACIÓN CON QUEMADORES AUTO-RECUPERATIVOS: ANÁLISIS NUMÉRICO
Alex M. García Vergara, Julián E. Obando Arbeláez, Andrés A. Amell Arrieta

CARACTERIZACIÓN FÍSICA-QUÍMICA-ENERGÉTICA DE PELLETS DE HOJARASCA RESIDUAL COMO BIOCOMBUSTIBLE RENOVABLE
William A. González, Diana López, Juan F. Pérez

CARACTERIZACIÓN DEL BIOCARBÓN SUBPRODUCTO DE LA GASIFICACIÓN EN LECHO FIJO COMO COMBUSTIBLE Y ENMENDADOR DE SUELOS
Hernán E. Díez, William A. González, Juan F. Pérez

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y VALIDACIÓN CFD DE UNA TURBINA DE FLUJO CRUZADO TIPO MICHELL-BANKI
Galvis S.H., Sierra J., Del Gallego Rico Mateo, Giraldo D., Sanín D.

REVISIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA EN COLOMBIA
Carlos Alberto Romero Piedrahita, Edison de Jesús Henao Castañeda, Jorge Eduardo Arango Gómez

DISEÑO ESTRUCTURAL DE TRANSPORTE PARA SISTEMA DE BOMBEO PORTÁTIL ACTIVADO CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ
Edwin Rúa R., Leonardo Cely, Ángela González A., Adriana Granados, Rafael Ramírez

ESTADO DEL ARTE DE LA REFRIGERACIÓN Y SU EVOLUCIÓN EN LOS TIEMPOS ACTUALES
Juan C. Ovando Sierra, Margarita Castillo Téllez, Augusto Sánchez Cifuentes, Br. Diego Chim Naal, Mauricio I. Huchin Miss

ESTADO DEL ARTE DEL AIRE ACONDICIONADO Y SU EVOLUCIÓN EN LOS TIEMPOS ACTUALES
Juan C. Ovando Sierra, Augusto Sánchez Cifuentes, Francisco Tec Acevedo, Miguel J. Martínez Ruiz, Gimer Cob Chi

OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL SISTEMA DE ADMISIÓN DE UN MOTOR HONDA CGL 125 MEDIANTE UN BANCO DE FLUJO ESTACIONARIO
González Lugo César L., Santiago Ruiz Juventino, González Oropeza Rogelio

INYECCIÓN ULTRASÓNICA DE GASOLINA
Rubén Carlos Esquivel Hernández, Milton Carlos Álvarez Sánchez, William Vicente

SISTEMA PARA EVALUAR IN-SITU LA CONTAMINACIÓN POR DERIVADOS DEL PETRÓLEO
Guillermo José Martínez Miranda, Juan Carlos Delgado Sanabria

DISEÑO DE UN SECADOR HÍBRIDO SOLAR-BIOMASA PARA MANZANAS EN EL MUNICIPIO DE NUEVO COLÓN BOYACÁ
Saúl Andrés Hernández-Moreno, Sergio Cano-Andrade, Edwin Torres-Díaz, Edwin Rúa-Ramírez

ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL TQ PLINT TE94 QUE FUNCIONA COMO ENFRIADOR DE AIRE Y BOMBA DE CALOR
Emanuel López Alba, Edgar Vicente Torres González, Helen D. Lugo Méndez, Sergio Castro Hernández, Israel Eliú Hernández Mora, Alejandro Torres Aldaco, Raúl Lugo Leyte

SECADO DE NUEZ DE LA INDIA CULTIVADA EN CAMPECHE, MÉXICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS SOLARES DIRECTAS Y BAJO CONDICIONES CONTROLADAS
Margarita Castillo Téllez, Juan Carlos Ovando Sierra, Francisco Lezama Zárraga, Diana C. Mex Álvarez

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE UN COMPRESOR CENTRÍFUGO
Alejandro Torres Aldaco, Raúl Lugo Leyte, Miguel Toledo Velázquez, Helen Lugo Méndez, Judith Cervantes Ruiz

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN COLECTOR TÉRMICO SOLAR HECHO CON NEUMÁTICOS RECICLADOS
Elkin A. Mora E., Edison Martínez O. Jorge A. Velasco

COMPARISON OF CFD SIMULATION TOOLS IN THE STUDY OF VORTEX EFFECT ON WIND ROTOR BLADE TIP
Tatiana Ortegón Sarmiento, William Gómez Rivera, Hernán Cerón Muñoz

AERODYNAMIC EVALUATION WITH CFD OF TIP DEVICES IN BLADE FOR WIND TURBINE
Héctor Parra Peñuela, William Gómez Rivera, Hernán Cerón

ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL CICLO COMBINADO EN MODO HÍBRIDO DEL VALLE DE MÉXICO DE 384 MW A DIFERENTES CARGAS PARCIALES CONSIDERANDO CAÍDAS DE PRESIÓN Y DE TEMPERATURA
Sandra Marisol Sánchez Domínguez, Raúl Lugo Leyte, Helen Denise Lugo Méndez, Israel Eliú Hernández Mora, Edgar Vicente Torres González

CARACTERIZACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR COMPACTO CON RECUBRIMIENTO SELECTIVO
Joaquín-Alfredo Velázquez-Olvera, David Palomino-Merino, Stephanía Velázquez-Olvera, Enrique Barrera-Calva

BANCO DE INSTRUMENTACIÓN PARA EL ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES PROVENIENTES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA
Juan David Ramírez, Juan Camilo Mejía Hernández, Héctor Fabio Quintero, Edison de Jesús Henao Castañeda, Carlos Alberto Romero Piedrahita y Wilson Pérez Castro

PARTE C: Materiales y Procesos de Manufactura

USINAGEM DE RESINA CIBATOOL APLICADA À PRODUÇÃO DE MODELOS
Marco Tipkovic Filho

MATERIALES COMPUESTOS DE SUPERFICIE SÓLIDA ELABORADOS A PARTIR DE UN JARABE DE POLIMETIL METACRILATO, TRIHIDRÓXIDO DE ALUMINIO (ATH) Y CARGAS MINERALES NATURALES (CMN)

Adan Arribasplata Seguin, Kelly Lucas Lizano, Juan Rueda Sánchez, Julio Acosta Sullcahuamán

MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON RESIDUOS CERÁMICOS Y MATRIZ DE POLIESTER INSATURADO PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ
Antonio Velasco Parra, Bladimir Ramón Valencia, William Javier Mora Espinosa

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO DE RECUBRIMIENTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO
Enrique Alejandro López Baltazar, Haideé Ruiz Luna, Alejandro López Ibarra, Francisco Alvarado Hernández, Víctor Hugo Baltazar Hernández

ESTUDIO DE MATERIALES PRECURSORES DEL RECICLAJE Y SUS ATRIBUTOS MECÁNICOS CON APLICACIÓN AL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LADRILLO ECOLÓGICO
Jefferson Moreno Rojas, Bladimir A. Ramón Valencia, Albert Miyer Suárez Castrillón

MATERIAL COMPUESTO ALTERNATIVO PARA SISTEMAS DE ENTIBACIÓN DE MINERÍA DE CARBÓN DE NORTE DE SANTANDER
Neyl Richard Triviño, Rafael Bolívar León, Claudia Patricia Parra Medina

SYNTHESIS OF TITANIUM POWDER BY METALOTHERMIC REDUCTION
Rafael Bolívar León, Bernd Friedrich

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TRIBÓLOGICO DE BUJES PARA ELECTRODOMESTICOS OBTENIDOS POR PULVIMETALURGIA CON ADICIÓN DE ESTAÑO O ZINC
Juan Pablo Candelo González

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA RPET (TEREFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO) MODIFICADO CON REFUERZO DE GRAFENO
Rojas Omar F., Muñoz, Efrén J.

EFECTO DE LA VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN EN IMPRESIONES 3D SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL POLIACIDO LACTICO
Holger Cacua, César Peña C., Bladimir Ramón Valencia

MEJORAMIENTO DE LOS FALSOS RECHAZOS GENERADOS POR LOS INSPECTORES DE BOTELLA VACÍA POR MEDIO DE UN CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS (CEP)
Martha Catalina Ospina Hernández, Albert Miyer Suarez Castrillón, Elkin Gregorio Flórez Serrano, José Roberto Marín

ANALISIS DE ACERO LAMINADO ANTES Y DESPUÉS DE SOLDADO, MEDIANTE PRUEBAS DE METALOGRAFÍA Y MACROATAQUE.
Fabián Leonardo Higuera Sánchez, Luis Fernando Acosta Joya, Juan Rodrigo Salamanca Sarmiento, Mateo Acero Becerra

SELECCIÓN DE MATERIAL PARA LA ESTRUCTURA DE UN PANEL ACÚSTICO USADO EN EL AMBIENTE HOSPITALARIO
Paula Andrea Gómez Vélez, Sebastián Gallo Pizano, Nelson Javier Escobar Mora, María del Pilar Rivera Vega, Beatriz Janeth Galeano Upegui

MONTAJE DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA CAPTURAR IMÁGENES DE DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE
Luz Karime Hernández Gegen, Edison Martínez Oviedo, José Humberto Arévalo

REVIEW, FIBRAS NATURALES COMO ALTERNATIVA DE REFUERZO EN MATERIALES COMPUESTOS
William Javier Mora Espinosa, Bladimir Azdrubal Ramón Valencia, Gonzalo G. Moreno Contreras

PARTE D: Mantenimiento y Docencia Universitaria

MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ BASADO EN UN DIAGNOSTICO TRIBOLÓGICO
Miguel Ángel Olivares Torres, Andrés López Velázquez, Rosario Aldana Franco, Ervin Jesús Álvarez Sánchez

HACIA EL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA INDUSTRIA 4.0
Sara Yépez, Mary Vergara, José Aguilar

USO DE LA METODOLOGÍA FMECA - RCM, PARA LA OPTIMIZACION DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO EN UNA PLANTA DE TOSTACION DE COBRE
Edgar Estupiñan, Oscar Cordero

MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN MOTOCOMPRESORES
Abraham Montalvo Rojas, Rosario Aldana Franco, Andrés López Velázquez, Ervin Jesús Álvarez Sánchez, Fernando Aldana Franco, Yazmín Rivera Peña

INCREMENTO DEL TAMAÑO DE LOS DATOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA
Adriana Guamán Buestán, Diego Cabrera Mendieta, René V. Sánchez Loja, Mariela Cerrada Lozada, Juan Manuel Cevallos Ampuero

DESARROLLO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
William Javier Mora Espinosa, Bladimir Azdrubal Ramón Valencia, Elkin Alberto Mora Espinosa

GESTIÓN DE LA CONFIABILIDAD Y OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UN SISTEMA DE AIRES ACONDICIONADOS EN ZONASRESIDENCIALES
Félix Argeyde Ortiz Garzón, Luz Karime Hernández Gegen, José Manuel Ramírez Quintero

MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM), EN EL BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ MANUEL SEDAS RINCÓN DE HUATUSCO, VER
Hugo Alfredo Quiroz Vásquez, Francisco Espinosa Mejía, Luis Omar Jamed Boza, Rosario Aldana Franco, Oscar López Iza

MONITORIZADO DE LA CONDICIÓN DEL ACEITE DE MOTORES DE AUTOMOCIÓN MEDIANTE UN KIT DE PRUEBAS RÁPIDAS
Juan Carlos Delgado Sanabria, Simón de Jesús Fygueroa Salgado, Rafael Bolívar León

ACTUALIDAD DE LOS EGRESADOS DE INGENIERÍA MECÁNICA – UNIPAMPLONA

Gonzalo G Moreno C, Elkin G Flórez, Juan Carlos Serrano Rico

USO DE TECNOLOGÍAS MÓVILES APLICADAS A LA ENSEÑANZA DE PROYECCIONES ORTOGONALES EN EL CURSO EXPRESIÓN GRÁFICA I

Nómar Alexis Cárdenas Parada, Yymmy Sydney Estévez Carvajal, Bladimir Azdrubal Ramón Valencia

PARTE A
Diseño Mecánico

RECONOCIMIENTO DE PERSONAS EN AMBIENTE CON EMISIONES DE HUMO USANDO SENSOR LASER Y REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES DESDE NUBE DE PUNTOS 3D. Parte 1.

RECOGNITION OF PEOPLE IN ENVIRONMENT WITH SMOKE EMISSIONS USING LASER SENSOR AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FROM 3D POINTED CLOUD. Part 1.

Dr. Ing. Abraham E. Gamarra Moreno[*], Dr. Ing. José A. Dávalos Pinto[**]

[*] **Pontificia Universidad Católica del Perú,** Escuela de Postgrado.
Av. Universitaria 1801, Lima, Lima, Perú.
(511) 626-2000 anexo 5146.
E-mail: aegamarra@pucp.edu.pe
[**] **Pontificia Universidad Católica del Perú,** Departamento de Ingeniería.
Av. Universitaria 1801, Lima, Lima, Perú
Tel (511) 626-2000 anexo 4677.
E-mail: jdavalo@pucp.edu.pe

Resumen: Cuando ocurren incendios en Plantas industriales, los materiales siniestrados y el humo dificultan la identificación del personal. Los Drones con sensores laser y redes CNN posibilitan el reconocimiento de personas en tales ambientes. El objetivo del proyecto es el estudio de un sistema neuronal convolucional para el reconocimiento de personas en un ambiente con emisiones de humo (parte1) y para su implementación usa un sensor laser, una tarjeta controladora y un dron (parte2). El método empleado consideró la realización de un reconocimiento de personas usando una red CNN previamente entrenada con nube de puntos 3D. La prueba se realizó con Alexnet e imágenes de personas. Los resultados (parte1) muestran que una matriz de confusión del 97.5 % ha sido alcanzada. Basado en el estudio, se concluye que el sistema neuronal de reconocimiento de personas usando CNN en ambientes siniestrados presenta un comportamiento muy aceptable para su aplicabilidad.

Palabras clave: Reconocimiento de personas, Redes neuronales convolucionales, programación en entorno Matlab, sensor laser y Dron.

Abstract: When fires occur in industrial plants, the damaged materials and smoke make it difficult to identify personnel. Drones with laser sensors and CNN networks enable the recognition of people in such environments. The objective of the project is the study of a convolutional neuronal system for the recognition of people in an environment with smoke emissions (part1) and for its implementation it uses a laser sensor, a controller card and a drone (part2). The method used considered the realization of a recognition of people using a CNN network previously trained with a 3D point cloud. The test was conducted with Alexnet and images of people. The results (part1) show that a confusion matrix of 97.5 % has been reached. Based on the study, it is concluded that the neuronal system of recognition of people using CNN in disaster environments presents a very acceptable behavior for its applicability.

Keywords: Recognition of people, convolutional neuronal networks, programming in Matlab environment, laser sensor and Drone.

1. INTRODUCCIÓN

Un área muy utilizada para el reconocimiento de objetos y personas es la visión artificial. La visión artificial se dedica a la identificación, localización y reconocimiento de objetos (Angulo, et al., 2001). Una definición adicional menciona que la visión artificial por computador es la capacidad de la máquina para ver el mundo que le rodea, más precisamente para deducir la estructura y las propiedades del mundo tridimensional a partir de una o más imágenes bidimensionales (Pajares & De la Cruz, 2008).

El proceso de la visión artificial toma una escena tridimensional y obtiene imágenes monocromáticas o en color; luego las imágenes pueden segmentarse para obtener los bordes o regiones de los objetos; a continuación, se realiza el proceso de descripción donde se obtienen las propiedades en detalle de los objetos para luego utilizar este resultado en la aplicación de interés (Pajares & De la Cruz, 2008).

La obtención de las imágenes en la visión artificial se realiza a través de cámaras digitales y se sugiere que el ambiente este iluminado para mejores resultados, por lo que no sería adecuado en ambientes que emanan humo. “La iluminación de la imagen es un factor importante que suele afectar a la complejidad de los algoritmos de visión. La iluminación arbitraria del entorno no suele ser aceptable ya que se obtienen imágenes con bajo contraste, reflexiones especulares, sombras y detalles espúreos” (Fu, et al., 1988).

La segmentación permite mejorar las imágenes para su posterior descripción. La segmentación se define como “el proceso que divide una imagen en objetos que sean de nuestro interés” (Fu, et al., 1988). La mejora de las imágenes a través de la segmentación no tiene éxito en ambientes que emanan humo debido a que los objetos están ocultos detrás del humo.

Las técnicas de visión artificial para el reconocimiento de personas fallan cuando el ambiente emana humo, debido a que se tendría una visibilidad baja. En (Expower, 2018) se menciona que “el humo también evita el paso de la luz dificultando el trabajo de los equipos de extinción y la extracción de los posibles heridos en el incendio”.

El uso de sensores LIDAR es una opción para la detección de personas u objetos en ambientes que no emanan humo y en trabajos de investigación previos se utilizaron estos sensores en combinación con una de las siguientes técnicas: algoritmos elementales de detección de personas (Hamme, et al., 2016), algoritmos de detección de personas en una nube de puntos (Hammer, et al., 2017) o la combinación de Modelo Mixto Gaussiano, clasificador bayesiano y el filtro de Kalman extendido (Tamás & Lazea, 2010).

Debido a las limitaciones de las técnicas de visión artificial para el reconocimiento de personas, que se encuentran en ambientes que emanan humo y que tengan fuego; se han propuesto el uso de las siguientes técnicas : la tecnología de holografía digital en el rango infrarrojo para obtener imágenes a través del humo y las llamas (Locatelli, et al., 2013), el uso del procesamiento térmico de imágenes estéreo que permite realizar el seguimiento de una persona y reconocimiento de gestos en ambientes llenos de humo (Kapusta, et al., 2016) y el uso de laser y sensores de sonido en combinación con un sistema de visión para el seguimiento de personas en ambientes lleno de humo (Sales, et al., 2010).

Sin embargo, en este artículo el reconocimiento y ubicación de personas en ambientes que emanan humo, se realiza utilizando sensores LIDAR en combinación con el uso de redes neuronales convolucionales (CNN). Los resultados sirven para la búsqueda de personas en edificaciones incendiadas que todavía emanan humo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Aprendizaje profundo

El aprendizaje profundo (Deep learning) es una área del aprendizaje automático, es una nueva forma de aprender a partir de los datos y pone énfasis en el aprendizaje desde capas sucesivas de representaciones (Chollet, 2018). La relación entre la inteligencia artificial, aprendizaje automático y aprendizaje profundo se muestra en la figura 1

(Chollet, 2018). El aprendizaje profundo se implementa utilizando una arquitectura de red neuronal y el término profundo se refiere a que la red puede tener hasta 150 capas (MathWorks, 2017).

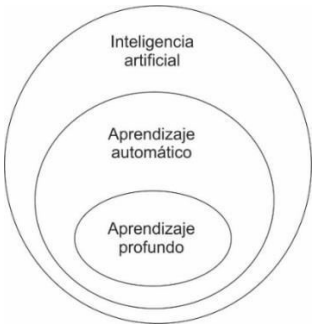


Fig. 1. Relación entre la inteligencia artificial, aprendizaje automático y aprendizaje profundo. Fuente: (Chollet, 2018).

2.2 Redes neuronales convolucionales

Las redes neuronales artificiales consisten de neuronas que tienen pesos entre sus conexiones y entradas activas denominadas "bias" (Joshi, 2017). Cada neurona recibe la entrada xi, luego se calcula z que es igual a la sumatoria del producto de los pesos wi por las entradas xi, a continuación, z se envía a una función de activación f(z) para luego encontrar la salida y (figura 2).

Las redes neuronales tienen una o más capas y la red neuronal multicapa tienen una capa de entrada, uno o más capas escondidas y una capa de salida (figura 3). Los algoritmos de aprendizaje de la red neuronal permiten ajustar los pesos de esta red.

Las redes neuronales convolucionales (CNN) es un tipo especializado de red neuronal para el procesamiento de datos que tiene una topología conocida, parecida a una matriz bidimensional. El nombre de red neuronal convolucional indica que la red emplea una operación matemática llamada convolución. La red neuronal convolucional está compuesta de una capa de entrada, muchas capas escondidas y una capa de salida.

El objetivo de las redes neuronales convolucionales es tomar imágenes sin procesar en la capa de entrada para luego obtener una correcta clasificación en la capa de salida

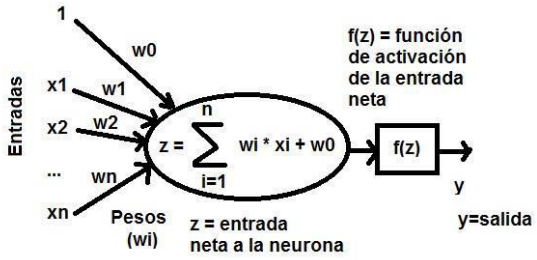


Fig. 2. Neurona artificial. Fuente: elaboración propia

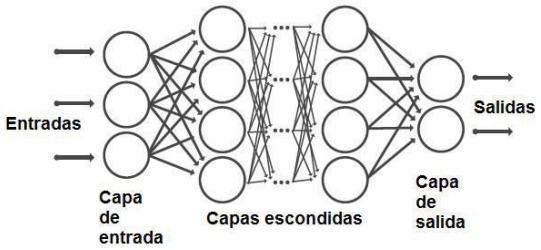


Fig. 3. Red neuronal multicapa. Fuente: (MathWorks, 2017).

La diferencia de las redes neuronales convolucionales con las redes neuronales ordinarias reside en el tratamiento de los datos y los tipos de capas que se utilizan (Joshi, 2017).

La red neuronal convolucional agrupa a las capas en detección de características y clasificación; en las capas de detección de características desarrollan uno de los tres tipos de operaciones: convolución (convolution), una capa de reducción (pooling), una capa de clasificación (rectified linear unit, ReLU), tal como se muestra en la figura 4. En la capa de clasificación se utilizan capas totalmente conectadas y la última capa utiliza la función softmax (figura 5) (MathWorks, 2017).

La capa convolucional calcula el producto punto entre los pesos y pequeñas áreas de la salida de capas previas, la capa de reducción o pooling reduce las dimensiones de las capas previas y la capa de clasificación o ReLU aplica una función de activación a la salida de la capa previa (Joshi, 2017).

La capa totalmente conectada (fully connected layer) calcula la clasificación que tiene cada clase en la salida.

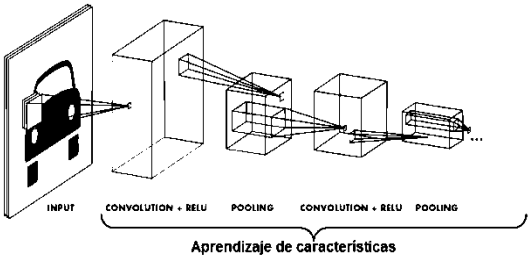


Fig. 4. Capas input, conv, ReLU y pooling de CNN. Fuente: (MathWorks, 2017).

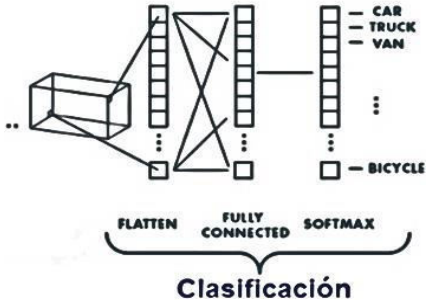


Fig. 5. Capas fully connected y sotfmax de CNN. Fuente: (MathWorks, 2017).

2.3 LIDAR

LIDAR, acrónimo (light detection and ranging), es una técnica de detección remota basada en laser (Campbell, 1997). Un sistema LIDAR consiste de: un transmisor laser; un transmisor óptico; un receptor óptico; un detector; y un sistema electrónico para adquisición de datos (Fujii & Fukuchi, 2005), como se muestra en la figura 6.

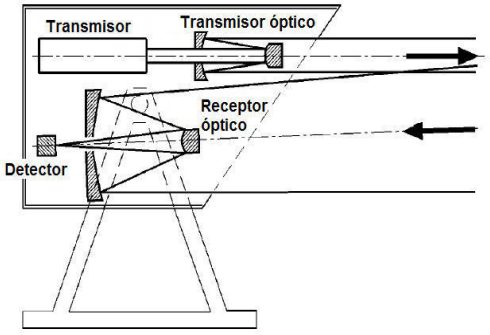


Fig. 6. Sistema de sensado laser LIDAR. Fuente: (Fujii & Fukuchi, 2005).

El sensor LIDAR se utiliza para medir la distancia a la que se encuentra un objeto. El tiempo transcurrido *t* entre el pulso transmitido y el pulso reflejado desde el objeto que se encuentra a una distancia *d* y considerando que el pulso se traslada a la velocidad de la luz *c,* se tiene que la distancia es: d = ½*c*t.

3. METODOLOGÍA

El procedimiento seguido (parte 1 del estudio) para el reconocimiento de personas utiliza sensores, tarjeta controladora y redes CNN como se muestra en la figura 7.

3.1 Entrenamiento de la red neuronal convolucional

Para el entrenamiento de la red neuronal convolucional no se ha partido desde cero sino que se ha utilizado una transferencia de aprendizaje desde una CNN denominada Alexnet.

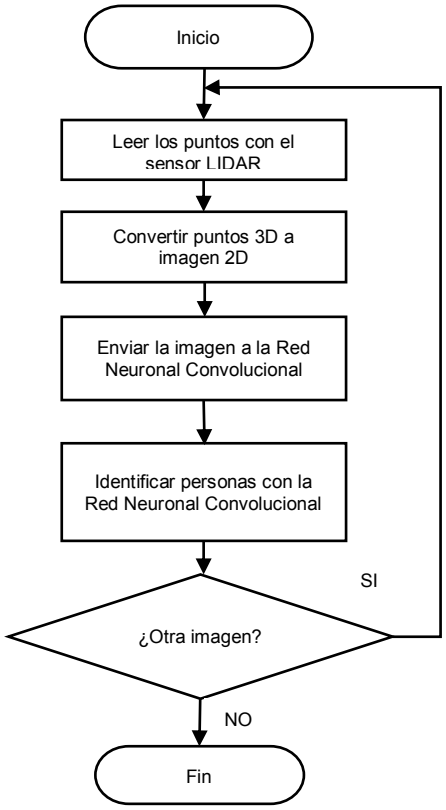


Fig. 7. Procedimiento para el reconocimiento de personas. Fuente: Elaboración propia.

AlexNet es una red CNN preconfigurada que ha sido entrenada con aproximadamente 1,2 millones de imágenes de la base de datos ImageNet (MathWorks, 2018). AlexNet consta de 25 capas y puede clasificar imágenes en 1000 categorías de objetos (animales, teclado, mouse, taza de café, lápiz y muchos otros objetos). MATLAB tiene un programa específico toolbox que contiene la red entrenada y se puede transferir el aprendizaje previo reentrenando la capa 23 (MathWorks, 2018). Las capas de AlexNet que se ha utilizado en la transferencia de aprendizaje son descritas a continuación:

capa01: 'data', (image input [227x227x3]).
capa02: 'conv1', (convolution 96[11x11x3]
with stride [4 4] and padding [0 0 0 0]).
capa03: 'relu1', (ReLU).
capa04: 'norm1', (cross channel normalization
with 5 channels per element).
capa05: 'pool1', (max pooling 3x3
with stride [2 2] and padding [0 0 0 0]).
capa06: 'conv2', (convolution 256[5x5x48]
with stride [1 1] and padding [2 2 2 2]).
capa07: 'relu2', (ReLU).
capa08: 'norm2', (cross channel normalization
with 5 channels per element).
capa09: 'pool2', (max pooling 3x3
with stride [2 2] and padding [0 0 0 0]).
capa10: 'conv3', (convolution 384[3x3x256]
with stride [1 1] and padding [1 1 1 1]).
capa11: 'relu3', (ReLU).
capa12: 'conv4', (convolution 384[3x3x192]
with stride [1 1] and padding [1 1 1 1]).
capa13: 'relu4', (ReLU).
capa14: 'conv5', (convolution 256[3x3x192]
with stride [1 1] and padding [1 1 1 1]).
capa15: 'relu5', (ReLU).
capa16: 'pool5', (max pooling 3x3
with stride [2 2] and padding [0 0 0 0]).
capa17: 'fc6', (fully connected 4096 layer)
capa18: 'relu6', (ReLU).
capa19: 'drop6', (dropout 50%).
capa20: 'fc7', (fully connected 4096 layer).
capa21: 'relu7', (ReLU).
capa22: 'drop7', (dropout 50%).
capa23: 'fc8', (fully connected 1000 layer).
capa24: 'prob', (function softmax).
capa25: 'output', (classification output
with 'tench' and 999 other classes).

Para crear el prototipo de la identificación de personas en ambientes que emanan humo en Matlab, se ha realizado el reentrenamiento de la capa 23 de la red AlexNet utilizando 4 imágenes por cada categoría como se muestra en la figura 8.

3.2 Adquisición de datos (imágenes).
Para identificar a las personas que se encuentran en ambientes que emanan humo(parte 1 del estudio) se utiliza un sensor laser LIDAR-lite 3, una tarjeta controladora Arduino UNO y una Laptop con Matlab. El sensor obtiene una nube de puntos en 3D que representa a los objetos que naturalmente contienen personas que se encuentran en el ambiente.

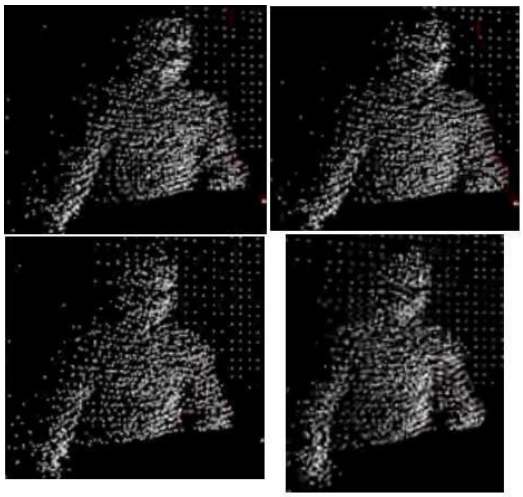


Fig. 8. Una categoría de imagen utilizada en el entrenamiento de la red CNN AlexNet. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Conversión de imagen de puntos 3D a 2D.
La imagen que contiene a la nube de puntos en 3D se convierte a 2D y se realiza a través de un programa implementado en MATLAB.

3.4 Identificación de personas con red CNN.
Se ha implementado un prototipo en MATLAB que permite utilizar la red AlexNet reentrenada, el cual recibe las imágenes a clasificar. Para identificar si se encuentran personas dentro de las imágenes se envía a la red neuronal convolucional la imagen que incluyen personas e imágenes con otros objetos en el ambiente como se muestra en la figura 9.

4. RESULTADOS

Para obtener los resultados en la clasificación de personas en ambientes que emanan humo (parte 1 del estudio) se han enviado a la red neuronal convolucional 20 imágenes con ambientes que contienen personas (AP) y 20 imágenes con ambientes que no contienen personas (ASP).

La cantidad de imágenes enviadas a la red neuronal convolucional para cada clase se muestran en la tabla 1.

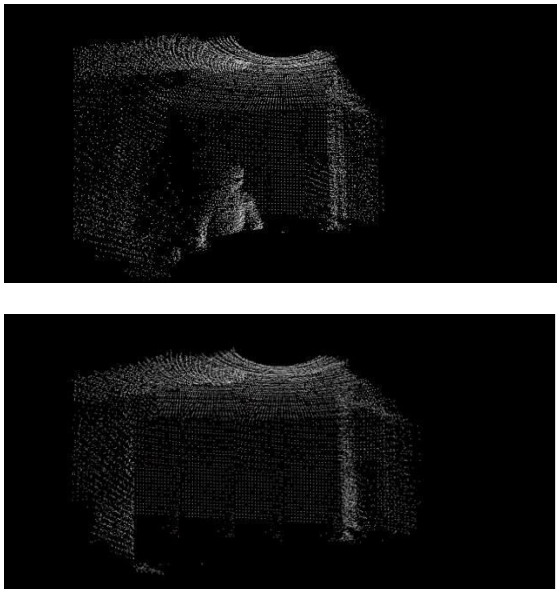


Fig. 9. Imágenes enviadas a la red CNN que incluyen personas u otros objetos.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Cantidad de imágenes para la clasificación

	Cantidad de imágenes
Ambiente con una persona	20
Ambiente con objeto (no persona)	20
Total	40

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el desempeño en la clasificación de personas que tiene la red neuronal convolucional en ambientes que emanan humo se ha utilizado una matriz de confusión.

Los resultados de la matriz de confusión en clasificación de personas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Matriz de confusión en la clasificación

		Predicción			
	n=40	**AP**	**ASP**	**Total**	**Exactitud del usuario**
Obser-vación	**AP**	19	1	20	95%
	ASP	0	20	20	100%
	Total	19	21	40	
	Exactitud del productor	100%	95.238%		

AP(Ambiente con persona) y ASP(sin persona).
Fuente: Elaboración propia.

La discusión de los resultados de la tabla 2 es la siguiente:

- La diagonal principal muestra la cantidad de imágenes clasificadas en forma correcta, en este caso 19 para AP y 20 para ASP de un total de 40 imágenes.
- La cantidad de imágenes que no se clasificaron en forma correcta están fuera de la diagonal, en este caso esta en la intersección de la fila AP y de la columna ASP y existe 1 imagen clasificada en forma incorrecta.
- En la fila AP se observa que 19 imágenes de esta clase fueron clasificados por la CNN en forma correcta y 1 en forma incorrecta. El porcentaje de AP clasificados en forma correcta es de 95%.
- En la fila ASP se observa que 0 imágenes de esta clase fueron clasificados por la CNN en forma incorrecta y 20 en forma correcta. El porcentaje de ASP clasificados en forma correcta es de 100%.
- La exactitud global o el porcentaje de los datos que se han clasificado correctamente en la matriz de confusión es de 97.5%.
- El estadístico Kappa de la matriz de confusión es 0.95 y el efecto que tiene el azar en la clasificación de las imágenes.

4. CONCLUSIONES

De los resultados mostrados y de su discusión (parte 1 del estudio) se puede obtener las siguientes conclusiones:

-La red CNN clasifica los dos tipos de imagen con una exactitud global en la matriz de confusión del 97.5%, lo cual es aceptable para los objetivos del proyecto,

-La red neuronal convolucional AlexNet, permite transferir su aprendizaje a través del reentrenamiento de la capa 23 facilitando la clasificación de imágenes,

-Se ha usado de manera satisfactoria el estado del arte en redes neuronales aplicadas a la clasificación de imágenes lo cual será de gran utilidad para abordar la parte 2 del estudio.

REFERENCIAS

Campbell, M., 1997. Sensor Systems for Environmental Monitoring. Volume One: Sensor Technologies. Glasgow: Chapman & Hall.

Chollet, F., 2018. Deep Learning with Python. New York: Manning Publications Co..

Fujii, T. & Fukuchi, T., 2005. Laser Remote Sensing. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Hamme, M., Hebel, M. & Arens, M., 2016. Automated object detection and tracking with a flash LiDAR system. s.l., SPIE.

Hammer, M., Hebel, M. & Arens, M., 2017. Person detection and tracking with a 360° lidar system. Warsaw, SPIE.

Kapusta, A., Beeson & Patrick, 2016. Person Tracking and Gesture Recognition in Challenging Visibility Conditions Using 3D Thermal Sensing. New York, IEEE, pp. 1112-1119.

Locatelli, M. y otros, 2013. Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography, Washington: Journal Optics Express.

MathWorks, 2017. Introducing Deep Learning with MATLAB. Natick: The MathWorks, Inc.

Pajares, G. & De la Cruz, J., 2008. Visión por Computador. México.: Alfa y Omega.

Sales, J. y otros, 2010. Multi-Sensor Person Following in Low-Visibility Scenarios. Castellón, Sensors, pp. 10953-10966.

Tamás, L. & Lazea, G., 2010. Pattern recognition and tracking dynamic objects with LIDAR. Cluj-Napoca, ISR/ROBOTIK, pp. 278-283.

SIMULACIÓN DEL DESGASTE DE HERRAMIENTA EN PROCESOS DE TORNEADO.

WEAR SIMULATION IN THE TOOL TURNING PROCESS.

Ph.D. Luz Karime Hernández Gegen*, M.Sc. Edison Martínez Oviedo*
Ing. Jonathan Javier Pabón Rojas *

Universidad de Pamplona, Ingenierías y arquitectura, Ingeniería Mecánica, GIMUP.
Campus universitario KM 1 Vía Bucaramanga. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Teléfono: (57+7) 5685303 - 5685304
E-mail: lukahege@hotmail.com, Ed1son1nvent@gmail.com, jonathanjpabon@hotmail.com

Resumen: El presente trabajo, describe el desarrollo de una simulación con un modelo de elementos finitos basado en una aplicación del software ANSYS. El principal objetivo es identificar el desgaste producido en la herramienta de corte monofilo mediante la simulación de un proceso de torneado de metales. Se inicia con el diseño de la herramienta seguido de un análisis de elementos finitos en dos dimensiones para determinar los parámetros y condiciones requeridos en la simulación. Una vez se establecen los parámetros requeridos para el procesamiento se realiza un análisis en tres dimensiones. Posteriormente, se hace un estudio comparativo con imágenes obtenidas (mediante técnicas de visión artificial) del proceso real de desgate de herramienta, de esta manera se validan los resultados obtenidos en el proceso de simulación. Los principales factores comparados son: la influencia de un primer impacto, formación de viruta y la zona crítica que se ve influenciada por el desgaste. Finalmente, se consigue comparar los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la simulación, con la base de datos de imágenes capturadas en el mismo proceso y bajo las mismas condiciones de corte, las cuales fueron tomadas en prácticas de mecanizado.

Palabras clave: CAD, CAE, desgaste, herramientas, simulación, torneado.

Abstract: The following study describes the development of a simulation with finite elements model based in the application of the software called ANSYS. The main objective is to identify the wear produced in the monofilament cutting tool through the simulation of the metal turning process. It starts with the design of the tool, suddenly it is analyzed the finite elements in two dimensions in order to determine the parameters and the conditions required in the simulation. Once the parameters required for the simulation are set, the analysis in three dimensions is done. Afterwards, a comparative study is carried out with images taken from the real wearing tool process (through artificial vision techniques), in this way, the emerged results from the simulation process are validated. The principal aspects compared are: the first impact influence, shaving formation and the critical zone influence for the wearing process. Finally, it is possible to compare the results obtained from the different simulation phases, with the database of the images taken in the same process, under the same cutting conditions that were taken in the mechanization practices. .

Keywords: CAD, CAE, simulation, tool, turning, wear.

1. INTRODUCCIÓN

Diversos sistemas de predicción y monitoreo de desgates han sido estudiados y analizados con el fin de establecer un ideal para la vida útil de la herramienta. Estos sistemas de monitoreo están divididos en dos métodos de medida, directos e indirectos. Los métodos directos son los más exactos a la hora de evaluar el desgaste, no son los más utilizados puesto que en la mayoría requiere la extracción de la herramienta y su medida en dispositivos adecuados. Los métodos indirectos son más utilizados por su sencillez y facilidad de lectura, implican las medidas de desgaste a través de variables intermedias como fuerzas, temperatura, vibraciones, o potencia consumida (Gegen, 2007). Luis Andrade y Qun Ren (Maia, Abrao, Vasconcelos, Sales, & Machado, 2015), (Ren, Baron, Balazinski, Botez, & Bigras, 2015), estudiaron métodos indirectos relacionados con emisiones acústicas para determinar la vida y desgaste de la herramienta. Andrade comparo valores de frecuencia y excitación para la identificación de mecanismos de desgaste como un medio eficaz y preciso. Ren, presento una evaluación del desgaste de herramienta de corte en el proceso de torneado de alta precisión, mostrando que la incertidumbre en la señal acústica representa el desgaste en la herramienta. Siguiendo un rumbo de métodos indirectos, Rajiv (Yadav, Abhishek, & Mahapatra, 2015), M. Binder (Binder, Klocke, & Lung, 2015) y E. Falconnet (Falconnet, Chambert, Makich, & Monteil, 2015), presentaron enfoques en cuanto a simulación por medio de métodos de análisis de elementos finitos "FEM" para determinar el desgaste de herramientas de corte.

Actualmente es vanguardia el uso de simulaciones en elementos finitos, debido a su bajo costo comparado con el uso de prototipos funcionales. Ceretti et al (Ceretti, Lazzaroni, Menegardo, & Altan, 2000), afirmaron en su trabajo que con respecto a las operaciones de mecanizado el análisis de elementos finitos ha venido probando ser efectivo, simulando la formación de viruta y operaciones de corte. Importante hasta el punto de llegar a diseñar nuevas herramientas de corte y optimizar los procesos de mecanizado. En su trabajo presenta un análisis en 3D que apunta a simular operaciones de corte, en especial el corte ortogonal y operaciones de corte oblicuo. Comparándolo con otras simulaciones y resultados experimentales obtiene buenos resultados de este proceso. Así mismo, Attanasio et al (Attanasio, Ceretti, Fiorentino, Cappellini, & Giardini, 2010), evalúan por medio de métodos de elementos finitos, el avance de desgaste de una herramienta en procesos de corte. Implementan un nuevo modelo analítico de desgaste de herramientas, combinando el modelo de desgaste abrasivo de Takeyama y Murata (Takeyama & Murata, 1963) con el modelo de desgaste difusivo de Usui (Usui, Hirota, & Masuko, 1978). Haciendo uso de DEFORM 3D simulan procesos de corte evaluando el desgaste de herramienta, para luego, comparar el modelo de elementos finitos con el modelo analítico. Encontraron una buena habilidad de reproducir el desgaste de la herramienta, demostrando que se puede usar simulaciones FEM para identificar las condiciones del proceso de corte que puedan determinar el fallo de la herramienta.

Del mismo modo, el uso de simulaciones utilizando modelos de elementos finitos, es considerado una tendencia multidisciplinaria. Donde no solo se predice, si no también se analiza en tiempo real fenómenos físicos, útiles en la aplicación de diversos procesos de producción. Attanasio et al (Attanasio et al., 2010), coincide con Bin Li (Li, 2012), al afirmar que se ve reflejado en costos el uso correcto de la herramienta de corte. Attanasio expresa que el desgaste afecta la vida útil, sustitución de la herramienta y calidad del producto, siendo de interés para la mejora en procesos y costos (Attanasio et al., 2010). Bin Li coincide en la importancia de conocer la vida útil, estado de desgaste, parámetros y material centrándose más en los tiempos muertos (Li, 2012). El uso de FEM implica un costo en capacidad computacional y tiempo, valor que demuestra ser menor comparado con el costo de otros métodos como el uso de prototipos y modelos reales. Es por esto que las simulaciones resultan tener un factor atractivo. Ceretti et al (Ceretti et al., 2000), en su trabajo expresa que alrededor del año 2000 ha sido efectivo el uso de FEM a la hora de simular operaciones de corte y formación de viruta. Aprovechando esto avanzó en el uso de simulaciones de operaciones de corte, al pasar de análisis en 2D a simular procesos en 3D. De igual

manera J. Lorentzon y N. Järvstra˚t (Lorentzon & Järvstråt, 2008), definen como objetivo de su trabajo, desarrollar un modelo de desgaste con FEM que pueda predecir la geometría gastada en herramientas de carburo cementado, en el maquinado de aleaciones basadas en Níquel. Concluyendo que el modelo de fricción tiene gran influencia en el perfil de desgaste simulado.

Este trabajo pretende dar una visión del desgaste de herramienta mediante una simulación utilizando un software de elementos finitos. Los resultados obtenidos en la simulación se comparan posteriormente con imágenes reales de desgaste, con el propósito de validar la información.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de la simulación de elementos finitos, se parte de un CAD con geometría simplificada en dos y tres dimensiones. La herramienta monofilo utilizada es una plaquita para operaciones de cilindrado en un proceso de torneado. Las geometrías utilizadas en la simulación (material de trabajo y punta de la herramienta) se muestran más adelante. De estas dos se recorta y procesa el área de interés, con el fin de ahorrar en gasto computacional.

Por otra parte, se establecen parámetros y condiciones de simulación en cada una de las etapas, las cuales se enumeran a continuación.

2.1 Preprocesamiento

En esta fase se preparan las geometrías que van a interactuar en la simulación, los materiales que las componen y su respectivo mallado. La geometría de la herramienta, la pieza de trabajo y el material con el que están compuestos son datos específicos, los cuales se incorporan al programa sin mayores modificaciones. Por otra parte, en el proceso de mallado se ve involucrada la capacidad de decidir cuál tipo y densidad de malla es el correcto. Para esto se maneja la relación número de nodos-discrepancia, teniendo en cuenta como limitante el poder computacional de los equipos trabajados.

2.1.1 Importación y modificación de la geometría

Las geometrías simplificadas, son importadas al software de simulación. Un factor importante para llevar a cabo el proceso de simulación es la densidad de la malla, esta no puede ser tan escasa afectando los resultados, ni tan densa que derroche el proceso computacional. Teniendo en cuenta este gasto computacional al hacer un análisis en simulación de elementos finitos, se opta por un análisis previo en dos dimensiones que permite esclarecer los parámetros para un posterior análisis tridimensional. Estas geometrías se muestran a continuación.

Geometría 2D: con esta geometría se pretende hacer el análisis principal de simulación, para establecer parámetros y condiciones a evaluar. La Figura 1 muestra la sección lateral de la herramienta junto con el material de trabajo. Esta geometría se realizó en la herramienta DesingModeler del software ANSYS, para establecer el contorno y plano de las piezas a utilizar.

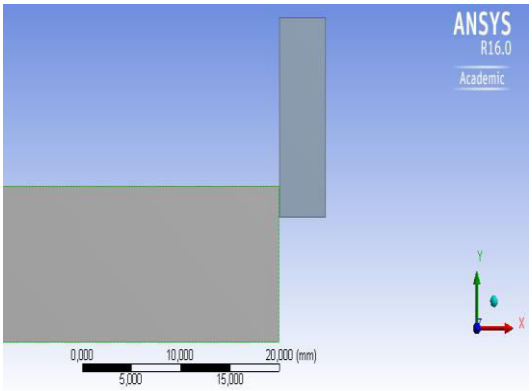


Figura 1. Geometría 2D, herramienta y material de trabajo.

Geometría 3D: para un análisis en 3D se tiene en cuenta solo la punta de la herramienta que se quiere evaluar, y sin cambios superficiales como el rompevirutas. En la Figura 2 se puede observar la punta de la herramienta junto con el material de trabajo igualmente recortado para un análisis simple. Esta geometría es realizada en software Solid Edge por su facilidad de proceso.

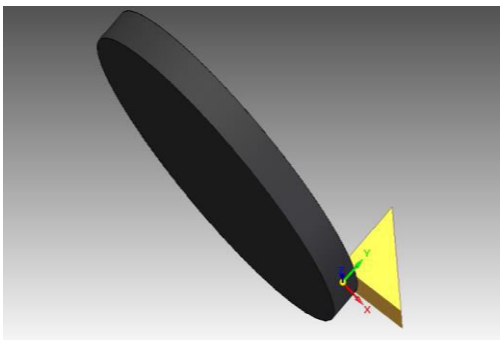


Figura 2. Geometría 3D de la punta de la herramienta y material de trabajo.

2.1.2 Incorporación de materiales

Los materiales utilizados en la simulación corresponden a los materiales que componen el inserto y material de trabajo y se ven representados en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales que intervienen en la simulación.

#	Material	Aplicación	Estado
1	Carburo cementado	Material de la herramienta	Incluido en la Engineering Data
2	Carburo de Titanio TiC	Recubrimiento	No existe en la Engineering Data
3	Nitruro de carburo de Titanio Ti (C,N)	Recubrimiento	No existe en la Engineering Data
4	Nitruro de titanio TiN	Recubrimiento	No existe en la Engineering Data
5	Acero AISI 4340	Material de trabajo	En Engineering Data

Entre los materiales contenidos en la tabla se hace necesario incluir en la Engineering Data el carburo cementado, para un análisis inicial de la herramienta de trabajo en el proceso de simulación. Por otra parte, como material de trabajo se empleará el Acero AISI 4340 y sus propiedades ya están incluidas en el software de simulación. El material incluido en el software junto con sus propiedades requiere un proceso especial el cual es detallado a continuación.

Carburos cementados: Materiales compuestos constituidos por partículas cerámicas introducidas en una matriz metálica, constituidos normalmente por carburo de Wolframio y Cobalto en donde el Cobalto puede variar entre 3 y 25 % en peso. La parte cerámica también puede contener carburos de titanio (TiC), tántalo (TaC) o niobio (NbC), mientras que la matriz metálica puede a veces presentar hierro, cromo, níquel o molibdeno. La matriz metálica brinda tenacidad y las partículas cerámicas aportan rigidez y dureza. Aproximadamente el 70% de las herramientas utilizadas para mecanizar aleaciones metálicas, están hechas con este material. Entre sus propiedades mecánicas cabe destacar su alta dureza, resistencia al desgaste y tenacidad (Henrik Nordenström, 2006). En la Tabla 2 se puede observar las propiedades del material de una herramienta de carburo cementado.

Tabla 2. Propiedades del material de herramienta de carburo cementado (Lorentzon & Järvstråt, 2008).

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Density	11900	Kg/m^3
Young's modulus	630	*Gpa*
Poisson's ratio	0.26	
Yield limit	4250	*Mpa*
Thermal expansión	5.4e-6	
Specific heat	334	$J/Kg^{\circ}K$
Thermal conductivity	100	$W/m^{\circ}K$

2.1.3 Mallado

Por medio del software se lleva a cabo el proceso de mallado, existe un método por defecto en el que el software toma la pieza y aplica un mallado estándar para un análisis general. En el caso del inserto se necesita conocer con más detenimiento los efectos de las fuerzas y deformaciones que actúan en una determinada cara o parte de la geometría. ANSYS permite modificar la densidad

de la malla en determinado punto de la geometría, así como también posee otras herramientas para casos específicos. Para este estudio solo se tiene en cuenta un refinamiento en la cara y borde que entrarían en contacto a la hora de la interacción.

Mallado de geometría en 2D: este proceso de mallado se realiza con un tamaño de 0,5 mm, para un posterior refinamiento grado 2 en la cara de contacto de la herramienta y grado 1 en el material de trabajo. De igual manera se utiliza la herramienta Face meshing que brinda un ordenamiento de malla en cuadriláteros. El resultado final se puede ver en la Figura 3.

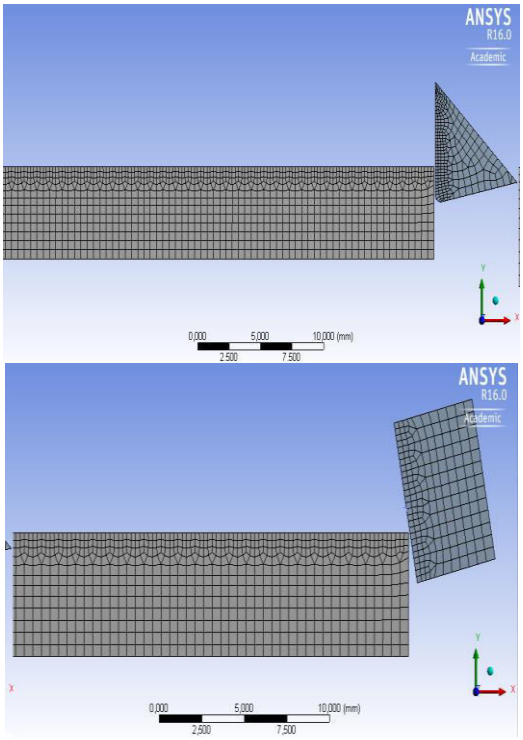


Figura 3. Mallado 2D, superior en vista de flanco e inferior en vista de cráter.

Mallado de geometría en 3D: el proceso de mallado en la geometría en 3D es similar al anterior con variantes de 2mm en el tamaño de elementos. El proceso de Face meshing se aplica en la cara de la herramienta y el borde exterior del tocho, en este último se le asigna un número de divisiones internas de 4. En la
Figura *4* se puede visualizar el mallado de la geometría 3D. Los refinamientos son de grado 3 en la cara de la herramienta y grado 1 en la superficie cilíndrica del tocho.

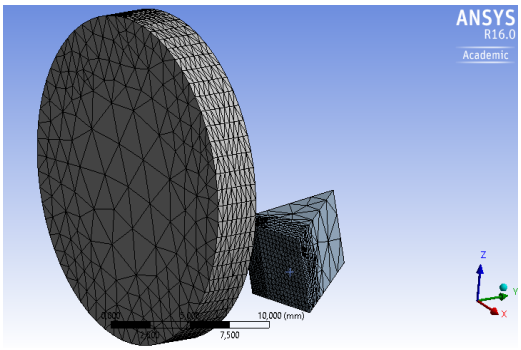


Figura 4. Mallado de la geometría 3D.

2.2 Procesamiento.

En la etapa de procesamiento se encuentran las variables con las que se ejecutará el modelo de elementos finitos, como lo son los desplazamientos de los objetos y parámetros de tiempo. Así mismo se incluyen los tipos de soluciones que se quiere analizar, en este caso la de mayor importancia es el desgaste en la punta de la herramienta. A continuación, se especifican estos parámetros.

2.2.1 *Setup*

Este es otro de los parámetros que influyen directamente en el tiempo de procesamiento, además del mallado. En esta configuración también se tiene en cuenta un límite de ciclos en el proceso de simulación, además de factores de seguridad y otros procesos que opcionalmente los controla el programa.

En esta etapa se logró identificar algunos de los parámetros que intervienen en la simulación de elementos finitos. Entre ellos se tienen: las caras que están en contacto de la herramienta y de la pieza de trabajo, la fricción en el proceso de corte, la interacción de los cuerpos con el mismo coeficiente de fricción, la configuración del análisis en donde se modifican los tiempos de simulación y desplazamientos, terminando en los tipos de solución que se requieren para el análisis y posterior validación. Algunos de estos parámetros están incluidos en el setup y la solución del modelo FEM empleado. En el apartado de resultados se tienen en cuenta estos parámetros con sus valores

identificados y utilizados; y el área al que pertenecen en la configuración del software.

2.2.2 *Solución*

En la solución se incorpora la deformación total en los cuerpos que intervienen en el análisis. Ya de modo más específico se tiene en cuenta un análisis a la deformación elástica equivalente en la cara del flanco de desgaste. De la misma forma analizando la cara de la herramienta se mira la máxima deformación elástica. De esta manera se puede observar en la parte izquierda de la Figura 5, las soluciones que se tienen en cuenta para el modelo estudiado.

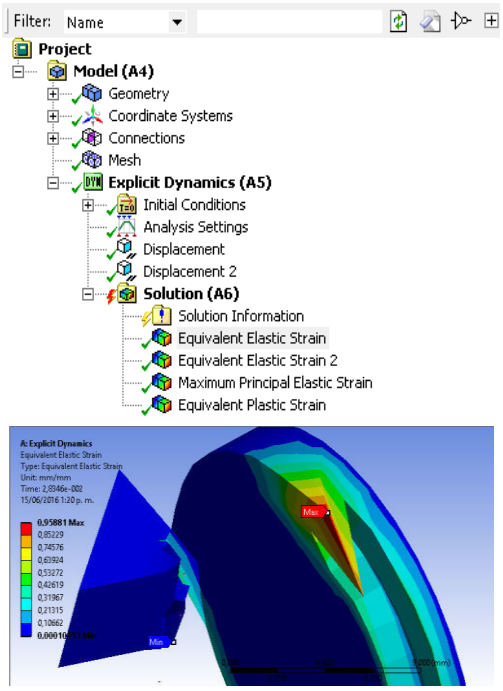


Figura 5. Soluciones presentes en el modelo

2.3 Postprocesamiento.

En la etapa de postprocesamiento se encuentra un análisis de resultados de acuerdo a la visualización de las simulaciones y datos de deformación. El software ANSYS permite realizar gráficos y tablas con factores variables. Estos factores van de acuerdo a la solución antes seleccionada.

2.3.1 *Resultados de postprocesamiento*

En este caso uno de los factores importantes es el tiempo que junto con la deformación brindan los parámetros necesarios para la evaluación del modelo. Se desarrolla el uso de tablas y gráficas con las soluciones antes seleccionadas y en los objetos de estudio. De esta forma se analizaron la deformación presente en la cara del flanco de la herramienta de corte. De igual manera se realiza un análisis de deformación, esto tiene como objeto una visión general del proceso de corte. El análisis se divide en las siguientes partes.

Análisis del primer contacto de la herramienta: Este análisis es importante ya que representa una deformación significativa en la punta de la herramienta. En la Figura 6 se puede observar el primer impacto y la deformación generada por este, a) en una escala de colores; y b) en una gráfica deformación vs tiempo.

Análisis de desgaste prematuro: este análisis se tiene en cuenta cuando los parámetros de corte en el proceso de torneado no son los indicados. Se presenta un desprendimiento de material de la herramienta junto con la deformación de la punta, cráter y flanco. En la Figura 7 se ve representado: a) la deformación prematura de la punta de la herramienta y b) la respectiva gráfica deformación vs tiempo.

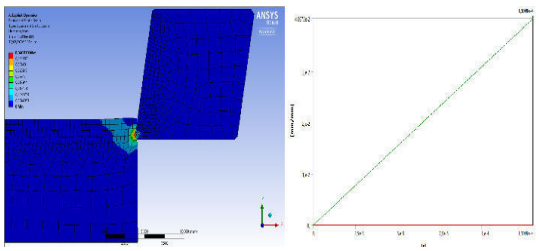
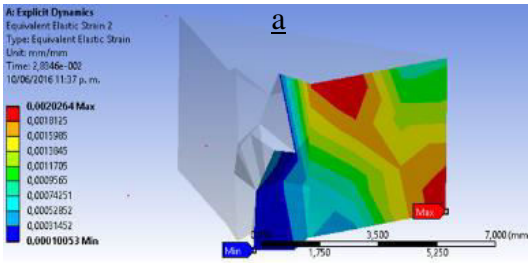


Figura 6. Análisis de primer impacto.



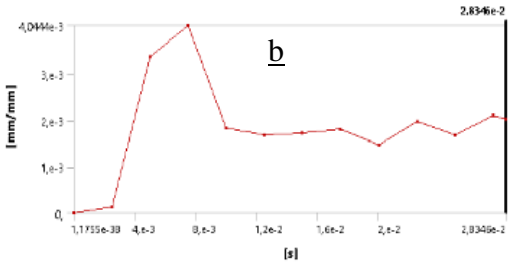


Figura 7. Deformación prematura de la herramienta.

Análisis de deformación en dos dimensiones: este análisis se realiza por la necesidad de simplificar el modelo de elementos finitos, debido al gasto computacional que implica realizarlo de manera normal. Con este análisis se busca establecer las propiedades y condiciones para una simulación más compleja en un modelo de tres dimensiones. El análisis de dos dimensiones se divide en dos modelos como se muestra en la Figura 8: a) el primero un modelo donde se evalúa el proceso de remoción de material teniendo en cuenta la velocidad de corte, y b) el segundo modelo evalúa la punta de la herramienta teniendo en cuenta el avance de la misma.

Análisis de deformación en tres dimensiones: por la necesidad de un modelo de desgaste en una zona específica, en este caso el flanco de la herramienta; se realizó un modelo en tres dimensiones utilizando todos los parámetros de corte del proceso de torneado. Este ejercicio de simulación implica un mayor gasto computacional, por lo cual se manejan tiempos de simulación cortos. En la Figura 9 se puede observar un proceso de simulación en tres dimensiones en el cual interviene el tocho con movimiento rotacional y la herramienta de trabajo posicionada con la profundidad de corte y su debido avance.

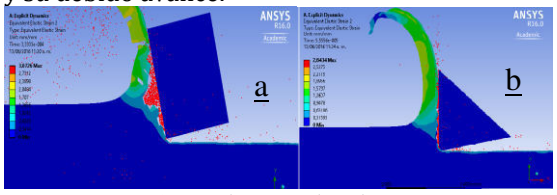


Figura 8. Análisis en dos dimensiones.

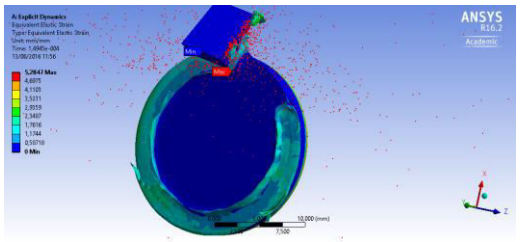


Figura 9. Análisis en tres dimensiones.

En cuanto a este ítem es importante destacar los primeros resultados sustanciales del proyecto, en donde se demuestra que el modelo de elementos finitos del software ANSYS es útil para la resolución de este tipo de problemas, en el apartado 6 de análisis de resultados se especifica cada uno de los logros obtenidos.

3. VALIDACIÓN

El proceso de validación se lleva a cabo comparando imágenes de desgaste real, con imágenes de la simulación del software ANSYS. Al obtener imágenes con parámetros relacionados se contrasta con el proceso de desgaste (deformación del flanco y punta de la herramienta) de una forma visual en primera instancia. El primer paso de este proceso es la recopilación de imágenes en la simulación con sus parámetros establecidos. Seguido de la inspección de las imágenes reales y establecer un parámetro de desgaste semejante ideal que permita usarse como medio de comparación.

3.1 Validación de desgaste prematuro de la herramienta

En esta validación se compara la imagen de la simulación de elementos finitos que vimos anteriormente con una imagen real donde se dio un desgaste de toda la punta de la herramienta de corte. Esta fractura se produjo por los parámetros con los que se operó dicha herramienta, esto con la necesidad de establecer los parámetros ideales. En la Figura 10 se puede ver las dos imágenes, simulación y desgaste real para establecer semejanzas.

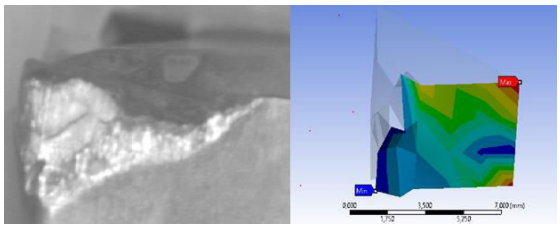


Figura 10. Validación de desgaste prematuro (Gegen, 2007).

Por otra parte, el software permite decidir si los elementos que intervienen en el análisis actúan como elementos flexibles o rígidos. Para poder ver la influencia de esta opción se opta en hacer una simulación variando estos parámetros. Como resultado se procede hacer el análisis estableciendo el material de trabajo como objeto rígido y a su vez la herramienta como objeto flexible. Este ejercicio se hace con geometría en 3D y fue evidente un desgaste total de la herramienta de corte como se muestra en la Figura 11.

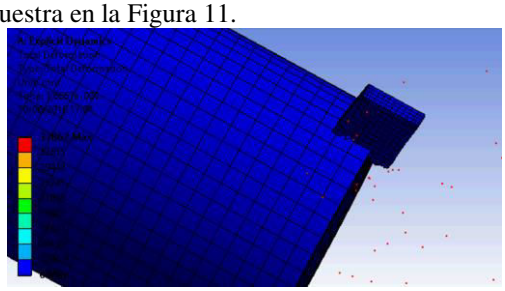
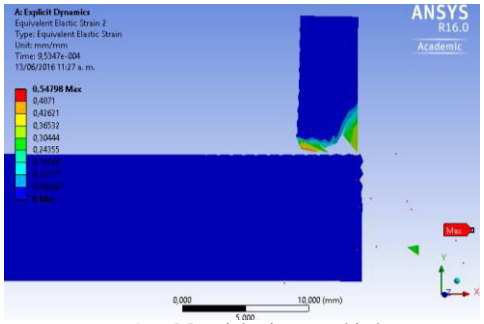


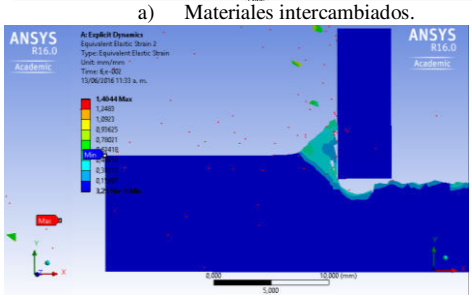
Figura 11. Validación material de trabajo rígido y herramienta flexible.

3.2 Validación al intercambiar materiales.

En este paso y con la intención de observar un material de trabajo con mayor dureza que la herramienta de corte, se procede a hacer un intercambio de materiales en las geometrías. El análisis en simulación se realiza en 2D con el fin de reducir gasto computacional. En la Figura 12 se presenta una comparación de dos simulaciones: en la parte a), el análisis se realiza intercambiando materiales y en la parte b), análisis en simulación con los materiales correspondientes.



a) Materiales intercambiados.

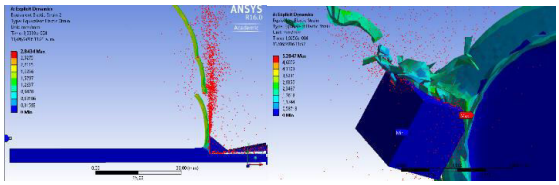


b) Materiales correspondientes.

Figura 12. Intercambio de materiales.

3.3 Validación en la formación de viruta.

La formación de viruta representa otro aspecto importante en el proceso de corte en torneado. En los análisis se utilizaron herramientas simplificadas para obtener así una malla menos densa, menor cantidad de nodos y elementos. Esto implica que las herramientas no tienen en su geometría un rompeviruta, como se ve en la Figura 13 se produce una viruta larga y continúa en análisis a) en dos dimensiones y b) en tres dimensiones.
Según el diseño de la herramienta la función del rompevirutas es reducir las dimensiones del desprendimiento de material. Al simular con geometrías simplificadas implica la ausencia del rompevirutas lo que se demuestra al observarse los grandes fragmentos de material desprendidos.



a) Dos dimensiones. b) Tres dimensiones.

Figura 13. Formación de viruta.

3.4 Validación de la zona de desgaste en geometría 3D

Mediante el análisis de simulación de desgaste de la herramienta se evalúa la zona propensa a desgaste. Por medio de una imagen que identifica la marca de desgaste, se procede a validar el proceso computacional en el análisis de elementos finitos. Se tiene que la simulación no representa un desgaste significativo debido al poco tiempo de análisis, por esto se evalúa mediante el área crítica que identifica la simulación. En la Figura 14 se puede observar una herramienta real con desgaste y una imagen de la simulación.

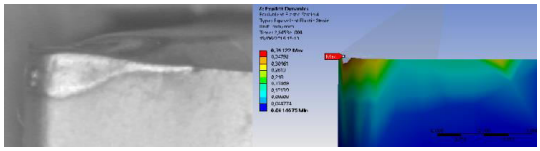


Figura 14. Zona de desgaste en tres dimensiones (Gegen, 2007).

Los ejemplos mencionados anteriormente proporcionan valides al proceso de simulación, se demuestra que el desgaste se representa en la cara del flanco de corte. Al poder comparar imágenes reales con imágenes simuladas, se abre la puerta a seguir con mayor profundidad el desarrollo de esta investigación. Para un análisis de resultados más centrado en el desgaste se recomienda al lector continuar con el siguiente apartado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De igual manera los resultados se dividen en las etapas de preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento, en donde se valora en cada una de estas fases la investigación realizada. Además, se tiene en cuenta los resultados del proceso de validación.

4.1 Preprocesamiento

Se optó por diseñar geometrías en dos dimensiones para análisis previos y evaluar parámetros, hasta llegar a la determinación de simplificar la geometría en tres dimensiones utilizando la punta de la herramienta sin cambios geométricos y el material de trabajo reducido.

Los resultados se determinan en función del número de nodos y elementos obtenidos después del proceso de mallado, serán ellos los que finalmente afecten el costo computacional de la simulación y los resultados de la misma.

4.1.1 Materiales.

En primera instancia se pudo investigar que materiales intervenían en el proceso de corte y las propiedades que los identificaban. Así mismo incorporarlos en el software de simulación y utilizar los que estaban en la biblioteca de materiales de ANSYS. Dentro de los materiales que intervienen en el proceso, está el carburo cementado que es la base de la herramienta de corte y el material de trabajo Acero AISI 4340 distinguido por su dureza, tenacidad y resistencia a la fatiga.

4.1.2 Mallado

Al tener en cuenta el gasto computacional se podría decir (dependiendo del ejercicio a simular), que un número menor de nodos implica menos procesamiento por lo que se procura disminuir la cantidad de ellos sin sacrificar la calidad de los resultados que se obtendrán. Por tal razón, la geometría seleccionada para la simulación posterior será la que involucra solo la sección de interés. Contando con 10898 nodos por parte de la herramienta y 18431 nodos de la pieza a mecanizar, para un total de 29329 nodos.

4.2 Procesamiento.

En esta etapa se logró identificar los parámetros, para utilizarlos posteriormente en el proceso de simulación, como se ve en la Tabla 3. Esta tabla brinda la información necesaria de las opciones que fueron modificadas en el programa. Teniendo en cuenta que las opciones del programa son numerosas, las que no se encuentren en esta tabla se dejaron por defecto. El tener estos parámetros establecidos brindó el ejercicio guía para pasar al siguiente ciclo de pruebas y análisis de resultados.

Tabla 3. Parámetros utilizados, valores y área de configuración.

PARÁMETRO	VALORES UTILIZADOS	ÁREA DE CONFIGURACIÓN
Sistema de coordenadas	*sistema de coordenadas global **otro sistema de coordenadas	Coordinate Systems
Contactos	3 caras en la herramienta 2 caras en el material de trabajo Por fricción: Coeficiente de fricción: 0.4 - 0.8 Coeficiente dinámico: 0.1 Constante de decaimiento: 0 Todas las caras	Connections
Interacción de cuerpos	Por fricción: Coeficiente de fricción: 0.4 - 0.8 Coeficiente dinámico: 0.1 Constante de decaimiento: 0	Connections
Tiempo de fin	5e-4 hasta 5e-2 [s]	Analysis Settings
Máximo erros de energía	0.1 – 0.5	Analysis Settings
Desplazamiento de la herramienta	0,2 [mm] cada 5e-2 [s]	Analysis Settings
Desplazamiento del material de trabajo	360 [°] cada 5e-2 [s]	Analysis Settings
Soluciones	Deformación elástica equivalente: todos los cuerpos. Deformación elástica equivalente: cara del flanco de la herramienta Deformación total: Todos los cuerpos Máxima deformación elástica: cara del flanco de la herramienta	Solution

* Sistemas de coordenadas global: este sistema es utilizado para la velocidad lineal de la herramienta, en el proceso de simulación; esto con la necesidad de tener otro sistema.
** Otro sistema de coordenadas: con la necesidad de tener un movimiento cilíndrico en el tocho o material de trabajo, se recurre a otro sistema de coordenadas modificando así el movimiento en función del tiempo y número de grados de desplazamiento.

Los valores de fricción utilizados van de acuerdo con el material de la herramienta en la interacción de los cuerpos en la simulación de elementos finitos estos valores son obtenidos según el autor Henrik Nordenström, (Henrik Nordenström, 2006).

4.3 Postprocesamiento.

En esta etapa el análisis de resultados es más enfocado a los datos que se obtienen desde la simulación, teniendo la deformación presente en diferentes casos. Estos análisis inician desde la representación del primer impacto, análisis a desgaste prematuro, terminando con la deformación en dos y tres dimensiones.

4.3.1 Primer contacto de la herramienta.

En este análisis se aplica un desplazamiento de la herramienta hacia el material de trabajo, luego de remover parte de material, la herramienta se retira del proceso, esto con el fin de evaluar el desgaste en un primer impacto. En la Figura 15 se observa este procedimiento, en donde se compara el desgaste generado por el primer impacto y la gráfica de tiempo vs deformación; dando como resultado un desgaste alto luego de esto el desgaste presente se mantiene prácticamente constante y cuando se retira la herramienta no se genera ningún cambio.

La Figura 15 corresponde perfectamente con la teoría de desgaste donde la relación con la Figura 16 es evidente en la primera zona de desgaste. Zona de desgaste rápido inicial donde se identifica en la simulación que hay cambio considerable en un tiempo diminuto.

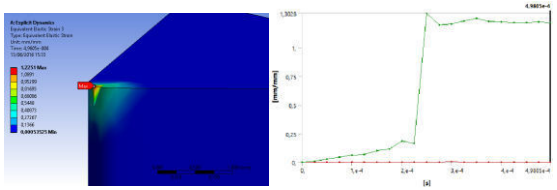


Figura 15. Imagen y gráfica de primer contacto.

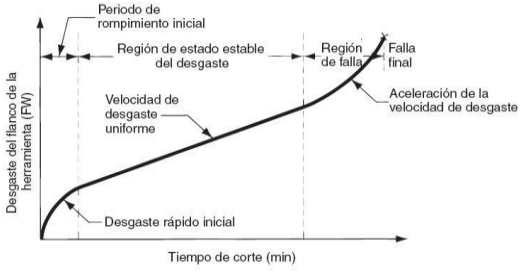


Figura 16. Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte.

4.3.2 Desgaste prematuro.

Los resultados de desgaste prematuro, están de acuerdo con el proceso experimental, pues es evidente un desprendimiento de material en la punta de la herramienta como se muestra en la Figura 7. Esto no solo indica que la simulación va por buen camino, sino que también es interesante para análisis posteriores.

4.3.3 Deformación en dos y tres dimensiones.

El análisis de dos dimensiones ayudo a esclarecer los parámetros y condiciones que intervienen en la simulación, también las limitantes del ejercicio como lo son: tiempo de corte, y complejidad en las geometrías. Sin embargo, este análisis no brinda los resultados necesarios para una posterior validación. Teniendo que recurrir a un análisis más complejo involucrando las geometrías en tres dimensiones y una mayor cantidad de nodos y elementos.

En la deformación en tres dimensiones no solo se puede evaluar el desprendimiento de material, sino que también se puede enfocar la deformación solo en las partes de interés. En este caso la cara de la herramienta en donde se obtiene un desgaste de flanco y punta. Esta incidencia del desgaste de flanco permitió comparar la simulación de desgaste con imágenes reales obtenidas del proceso experimental. Este medio de comparación se hace de una manera visual deteniéndose a observar las zonas críticas (más afectadas por la operación de remoción de material), para luego afirmar una coincidencia de desgaste con las imágenes reales.

4.4 Resultados de la validación.

4.4.1 Resultados de desgaste prematuro

La validación se realiza comparando imágenes de la simulación con imágenes reales de desgaste, de igual manera se valida utilizando configuración del programa. Con respecto a la comparación de imágenes se puede decir que el desgaste se presenta en la punta de la herramienta. Resultado de esto, una deformación abrupta como se muestra en la Figura 10, propia de parámetros mal establecidos en la operación de corte. Tal como ocurre en la realidad.

4.4.2 Resultados al intercambiar materiales

En un proceso inicial, para probar la lógica del programa, se realiza una serie de ejercicios en donde se intercambian los materiales de la herramienta y la pieza de trabajo. Esto se realiza con el fin de probar el desgaste producido en la herramienta, al tener en sus propiedades un material con menor dureza comparado con el material a mecanizar. Los resultados fueron claros y evidentes, puesto que hay una deformación total en la herramienta de corte, tal como se esperaba.

4.4.3 Resultados de la formación de viruta.

Como lo muestra la Figura 13 en el proceso de simulación en elementos finitos, hay una deformación de la pieza de trabajo. Como resultado la formación de viruta, se puede apreciar de una mejor manera en la parte a), un desprendimiento de material organizado y continuo. Resultado coherente pues la herramienta carece de un mecanismo para seccionar este material, conocido como rompeviruta. Sin embargo, en la parte b) en la geometría en tres dimensiones no se puede apreciar claramente la continuidad de la viruta, esto es debido al mallado escaso presente en la simulación. Mallado que se puede perfeccionar en un trabajo posterior para un mejor análisis de la formación de viruta, al estar enfocado el presente trabajo en la herramienta de corte, se opta por concentrar el gasto computacional en el flanco de la cara de desgaste de la herramienta.

4.4.4 Resultados de la zona de desgaste en la geometría 3D.

En la geometría de la simulación en tres dimensiones se aprecia una marca que identifica la zona de la herramienta afectada por el proceso de remoción de material. Utilizando esta marca se puede comparar la imagen de simulación con la imagen real. La simulación permite comparar la zona y forma en que incide el desgaste en el flanco. Obteniendo como resultado un área crítica similar al desgaste, en donde se va ver influenciado el desprendimiento de material propio de la herramienta.

5. CONCLUSIONES

Definiendo parámetros y condiciones para una simulación en elementos finitos que permitió analizar el proceso de desgaste de herramienta en una operación de torneado, se consiguió ajustar un modelo para una simulación confiable. De este ejercicio se pudieron definir las siguientes conclusiones:

- A partir de una simulación en 2 dimensiones se permitió hacer una prueba inicial donde se evaluó el procesamiento lógico del ejercicio, lográndose obtener parámetros (ver tabla 3) para alimentar el software ANSYS

- El proceso de simulación en tres dimensiones se pudo simplificar con el seccionamiento de la herramienta y el material de trabajo sin afectar la calidad de los resultados.

- Al simplificar la geometría utilizada en el procesamiento de 3D, se logra una reducción de nodos y elementos que disminuyen de manera directa el trabajo computacional. Se logra pasar de un número de 28360 nodos en la geometría normal a un total de 12830 nodos en la pieza recortada. Lo que implica una reducción aproximada del 55% en número de nodos, importante para un posterior procesamiento computacional.

- El método de comparación visual con imágenes reales de desgaste vs simulación, permite validar los resultados. Inicialmente en el ejercicio simulado se obtiene una fractura de la herramienta, tras operar con parámetros no indicados tal como ocurrió en las pruebas reales. Se obtiene una similitud que comprueba la valides de la simulación mediante diferentes parámetros replicados en la simulación tal como se hizo en la práctica.

- Ejercicios como este se fueron realizando, con la limitante del gasto computacional; por este motivo se realiza un análisis con tiempo reducido y se observan las zonas afectadas. La tendencia de las simulaciones al identificar el área de desgaste es aceptable, pues indica la zona más propensa a sufrir cambios geométricos. El limitar el gasto computacional no afecto los resultados obtenidos gracias al enfoque puntual en la zona de interés.

- La zona critica representada por su tendencia al desgate, en el proceso de simulación se asemeja al desgaste real de la herramienta. Afirmando lo conveniente de un posterior trabajo que profundice el desgaste de la herramienta.

- La formación de viruta fue la indicada, destacando su continuidad por la falta de un rompeviruta en la geometría analizada, este factor brinda una confianza en el proceso de simulación pues no solo hay desgaste en la herramienta, sino que también hay un buen desprendimiento de la pieza de trabajo.

Agradecimientos

Al laboratorio de Simulación computacional de la Universidad de Pamplona.

6. REFERENCIAS

Attanasio, A., Ceretti, E., Fiorentino, A., Cappellini, C., & Giardini, C. (2010). Investigation and FEM-based simulation of tool wear in turning operations with uncoated carbide tools. *Wear*, *269*(5-6), 344-350. https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.013

Binder, M., Klocke, F., & Lung, D. (2015). Tool wear simulation of complex shaped coated cutting tools. *Wear*, *330-331*, 600-607. https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2015.01.015

Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L., & Altan, T. (2000). Turning simulations using a three-dimensional FEM code. *Journal of Materials Processing Technology*, *98*(1), 99-103. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00310-6

Falconnet, E., Chambert, J., Makich, H., & Monteil, G. (2015). Prediction of abrasive punch wear in copper alloy thin sheet blanking. *Wear*, *338-339*, 144-154. https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2015.06.007

Henrik Nordenström. (2006). *Comportamiento tribomecánico de sistemas sustrato - recubrimiento duros*. Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado a partir

de https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3232

L. K. H. Gegen, «Propuesta de nuevos criterios de vida de herramienta de corte y determinación del desgaste a partir de la clasificación de imágenes digitales caracterizadas utilizando descriptores de región simples y basados en momentos .,» ciudad de leon, 2007.

Li, B. (2012). A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *35*, 143-151. https://doi.org/10.1016/J.IJRMHM.2012.05.006

Lorentzon, J., & Järvstråt, N. (2008). Modelling tool wear in cemented-carbide machining alloy 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *48*(10), 1072-1080. https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2008.03.001

Maia, L. H. A., Abrao, A. M., Vasconcelos, W. L., Sales, W. F., & Machado, A. R. (2015). A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. *Tribology International*, *92*, 519-532. https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2015.07.024

Ren, Q., Baron, L., Balazinski, M., Botez, R., & Bigras, P. (2015). Tool wear assessment based on type-2 fuzzy uncertainty estimation on acoustic emission. *Applied Soft Computing*, *31*, 14-24. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2015.02.037

Takeyama, H., & Murata, R. (1963). Basic Investigation of Tool Wear. *Journal of Engineering for Industry*, *85*(1), 33. https://doi.org/10.1115/1.3667575

Usui, E., Hirota, A., & Masuko, M. (1978). Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process—Part 1: Basic Cutting Model and Energy Approach. *Journal of Engineering for Industry*, *100*(2), 222. https://doi.org/10.1115/1.3439413

Yadav, R. K., Abhishek, K., & Mahapatra, S. S. (2015). A simulation approach for estimating flank wear and material removal rate in turning of Inconel 718. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *52*, 1-14. https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2014.12.004

USO DE MSC ADAMS EN LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE MECÁNICA DE LAS VIBRACIONES

MSc. Rodolfo Ponce Reynoso [*], MSc. Alba Nubia Tabares Arellano[*], MSc. Francisco León Acosta*, PhD. Ricardo Tapia Herrera**

[*] **Institución,** Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero, Programa Educativo de Ingeniería Metal-Mecánica e Ingeniería Mecatrónica
Av. Catalina Pastrana s/n Col. Ciudad Industrial, Iguala de la Independencia, Guerrero, México.
+52-733-33-40694. Ext. 128
E-mail: ponce.reynoso@gmail.com

[**] **Institución,** Universidad Tecnológica de la Mixteca, División de Estudios de Posgrado
Carretera a Acatlima Km. 2.5 Huajuapan de León, Oaxaca., México
E-mail: odracyr_gni@hotmail.com

Resumen: En este trabajo se explica el uso del software MSC Adams en la solución de problemas de mecánica de las vibraciones, con el objetivo de que los estudiantes y docentes de Ingeniería Mecánica lo empleen como una herramienta de simulación computacional para resolver problemas de dinámica multicuerpo. Además, se lleva a cabo la aplicación de la formulación matemática de la Transformada de Laplace para la solución de las ecuaciones diferenciales planteadas, así como también del empleo del método numérico de Runge-Kutta de orden 4 ejecutado en el entorno de programación de MATLAB. Los resultados y validaciones obtenidas de los tres diferentes enfoques en la solución de los problemas propuestos demuestran la factibilidad del uso del software.

Palabras clave: MSC Adams, mecánica de las vibraciones, Transformada de Laplace, Runge-Kutta de orden 4, MATLAB.

Abstract: In this work it is explained the use of the MSC Adams software in the solution of problems of vibration mechanics, with the aim that the students and teachers of Mechanical Engineering use it as a computational simulation tool to solve multibody dynamics problems. Likewise, it is carried out the application of the mathematical formulation of the Laplace Transform to the solution of the stated differential equations, as well as the use of the fourth order Runge-Kutta numerical method developed in the MATLAB programming environment. The obtained results and validations of the three different approaches in the solution of the proposed problems show the feasibility of the use of the software.

Keywords: MSC Adams, vibration mechanics, Laplace Transform, fourth order Runge-Kutta, MATLAB.

1. INTRODUCCIÓN

Una vibración mecánica es el movimiento de una partícula o cuerpo que oscila alrededor de una posición de equilibrio. La mayoría de las vibraciones en máquinas y estructuras son indeseables debido al aumento de los esfuerzos y a las pérdidas de energía que las acompañan. El análisis de vibraciones se ha vuelto cada vez más importante en los últimos años debido a la tendencia actual para producir máquinas de más alta velocidad y estructuras más ligeras.

ADAMS (Análisis Dinámico Automático de Sistemas Mecánicos) es un software potente para modelar y analizar la dinámica y vibraciones de mecanismos complejos. Emplea el método de Lagrange para crear las ecuaciones de movimiento.

Existen trabajos relacionados con el empleo de MSC Adams en el análisis de vibraciones mecánicas, como los que se encuentran en (Moravic *et al*., 2015), (Ahadi *et al*., 2014), (Dumitru *et al*., 2016), (Mohammadpanah, 2017), (Bertini *et al*., 2018), (Li y Li, 2007). Asimismo, en (Chikhale y Deshmukh, 2013) se presenta una comparativa de análisis de un sistema de suspensión de un vehículo, entre MSC Adams y Matlab. Por otro lado, se presentan trabajos de control de vibraciones como el que se menciona en (Alam *et al*., 2015). Finalmente, investigaciones en máquinas rotativas empleando Adams se encuentran en (Sapietova y Dekys, 2015).

El objetivo particular de éste artículo de investigación es revisar los fundamentos de la teoría de las vibraciones mecánicas, llevando a cabo simulaciones simples de sistemas masa-resorte-amortiguador, con excitación forzada y libre, por medio del software MSC Adams y su comparativa con otros métodos como la transformada de Laplace y el método de Runge-Kutta de orden 4.

2. BASES TEÓRICAS DE LA MECÁNICA DE LAS VIBRACIONES

Para efectos prácticos, la masa de un sistema mecánico es agrupada en una sola masa puntual. El efecto inercial del sistema dinámico se relaciona por medio de ésta masa agrupada.

Los resortes son elementos que aportan rigidez al sistema, almacenan energía potencial y para fines prácticos se supone que carecen de masa y son lineales. El resorte es capaz de almacenar energía dentro de él cuando es alargado o comprimido de su longitud original.

La energía disipada fuera del sistema mecánico es modelada por medio de un amortiguador unidimensional. El amortiguador viscoso, en principio, es capaz de disipar energía como calor fuera del sistema mecánico.

Estas tres componentes, masa, resorte y amortiguador pueden modelar cualquier situación de respuesta dinámica en un sentido general. Matemáticamente la ecuación lineal dinámica de equilibrio se representa como:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \qquad (1)$$

Donde, $F(t)$ es la fuerza externa aplicada dependiente del tiempo, que se aplica al sistema mecánico. Puede ser una función del tiempo relacionada a través de los términos seno y coseno (escenario de fuerza cíclico), puede ser una constante (escenario de amplitud no cambiante) o simplemente cero (no hay escenario de fuerza externa aplicada).

m, c y k denotan la masa, coeficiente de amortiguamiento y coeficiente de resorte del sistema, respectivamente.

x, $\dot{x}$ y $\ddot{x}$ denotan los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración.

La frecuencia circular natural se puede calcular a través de la ecuación:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (2)$$

Así también, ξ representa la razón de amortiguamiento:

$$\xi = {}^{c}/_{(2m\omega_n)} \quad (3)$$

Y por último, el periodo de oscilación se determina por medio de:

$$\tau_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (4)$$

3. MODELADO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MSC ADAMS Y METODO NUMÉRICO DE RUNGE-KUTTA, PARA UN GRADO DE LIBERTAD

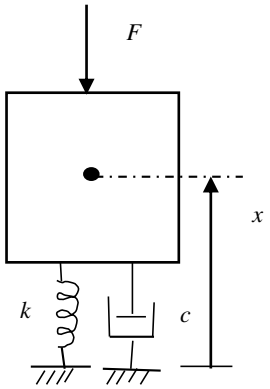


Figura 1. Sistema masa-resorte-amortiguador

Se simulará un sistema masa-resorte-amortiguador como el que se muestra en la figura 1. El sistema consiste en un cuerpo rígido con la posibilidad de movimiento traslacional en la dirección vertical. El cuerpo se conecta por medio de un sistema resorte-amortiguador a la base. Esto se modela a través del empleo de un resorte lineal y de un amortiguador viscoso. Se tienen los siguientes datos: m=1100 kg, k=1.5x10^6 N/m, c=7200 Ns/m, F_0=80 000 N, ω=25 rad/s. Inicialmente, al sistema se le proporciona una velocidad traslacional inicial de 10 m/s y ninguna fuerza externa es aplicada al sistema.

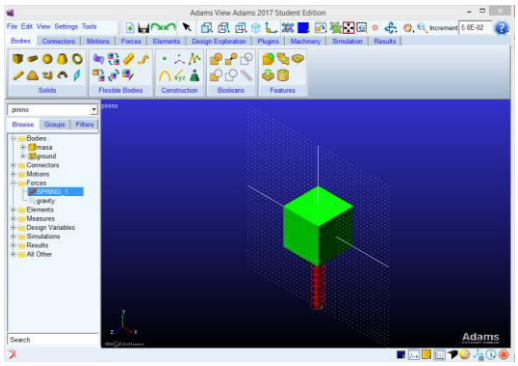


Figura 2. Modelo en MSC Adams del sistema masa-resorte-amortiguador

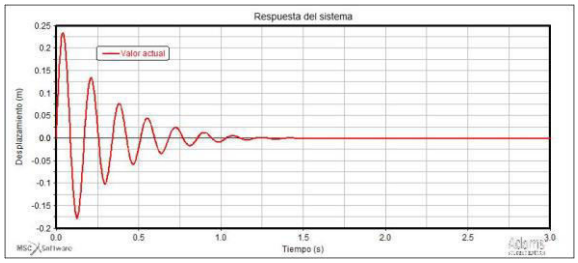


Figura 3. Respuesta del sistema en MSC Adams. Vibración amortiguada libre.

Con el propósito de resolver la ecuación diferencial de segundo orden, usando el método numérico de Runge-Kutta de orden 4, se reescribe la ecuación diferencial (1) como un conjunto de dos ecuaciones diferenciales de primer orden como se explica:

$$x_1 = x$$
$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x}$$
$$\dot{x}_1 = x_2 \equiv f_1(x_1, x_2) \quad (5)$$
$$\dot{x}_2 = -\frac{c}{m}(x_2) - \frac{k}{m}x_1 \equiv f_2(x_1, x_2) \quad (6)$$

Estas ecuaciones se introducen en el entorno de programación de Matlab y se obtienen los siguientes resultados:

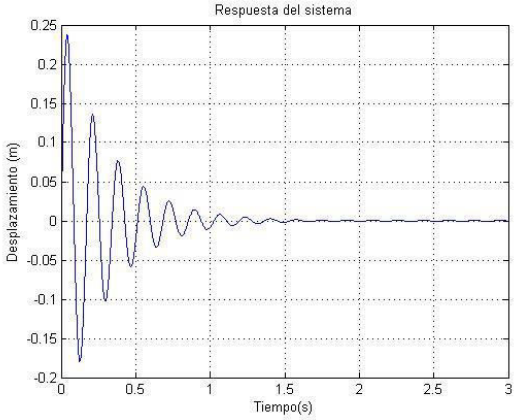


Figura 4. Respuesta del sistema empleando el método de Runge-Kutta de orden 4 programado en MATLAB. Vibración amortiguada libre.

Se presenta ahora el caso de una fuerza armónica externa, $F = F(t) = F_0 = \sin(\omega t)$, donde ω es medido en radianes por segundo. Se toma $F_0 = 100000$ N y ω=10 rad/seg.

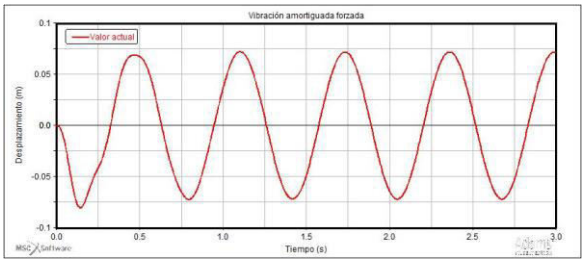


Figura 5. Respuesta del sistema en MSC Adams. Vibración amortiguada forzada, ω=10 rad/seg.

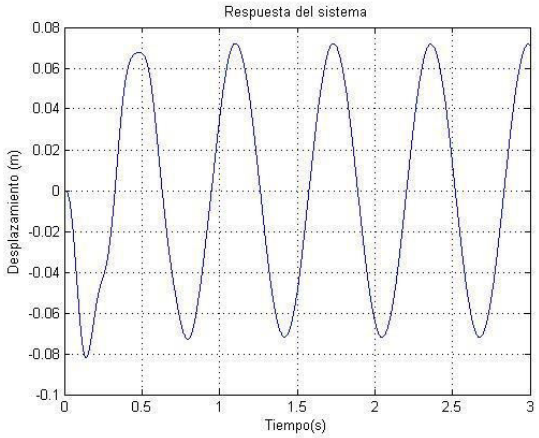


Figura 6. Respuesta del sistema empleando el método de Runge-Kutta de orden 4 programado en MATLAB. Vibración amortiguada forzada, ω=10 rad/seg.

Se observa en todos los casos, que los resultados obtenidos en MSC Adams en comparación con los que se generan usando el método de Runge-Kutta de orden 4 programado en Matlab, son exactamente los mismos.

3. MODELADO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MSC ADAMS Y TRANSFORMADA DE LAPLACE, PARA DOS GRADOS DE LIBERTAD

Cuando se especifican las condiciones iniciales, la Transformada de Laplace de cada ecuación en un sistema de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes reduce el sistema de ecuaciones diferenciales a un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas en las funciones transformadas. Se resuelve el sistema de ecuaciones algebraicas para cada una de las funciones transformadas y luego se determinan las transformadas de Laplace inversas.

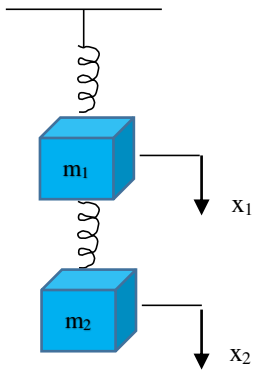


Figura 7. Sistema masa-resorte acoplado

El movimiento acoplado del sistema de la figura anterior se representa por el sistema de ecuaciones diferenciales simultáneas de segundo orden:

$$m_1 x_1'' = -k_1 x_1 + k_2(x_2 - x_1)$$
$$m_2 x_2'' = -k_2(x_2 - x_1) \qquad (7)$$

Con condiciones iniciales $x_1(0)=0$, $x_1' = 1$ m/s, $x_2(0)=0$, $x_2' = -1$ m/s. Además, $k_1=6$ N/m, $k_2=4$ N/m, $m_1=1$ kg, $m_2=1$ kg.

Sustituyendo las condiciones iniciales y bajo las suposiciones de los parámetros de masa y resorte, y aplicando la transformada de Laplace de cada una de las ecuaciones (7), se obtiene que:

$$s^2X_1(s) - sx_1(0) - x_1'(0) + 10X_1(s) - 4X_2(s) = 0$$

$$-4X_1(s) + s^2X_2(s) - sx_2(0) - x_2'(0) + 4X_2(s) = 0$$

Donde $X_1(s) = \mathcal{L}\{x_1(t)\}$ y $X_2(s) = \mathcal{L}\{x_2(t)\}$.

Simplificando las expresiones anteriores, usando la descomposición por fracciones parciales y aplicando la transformada inversa de Laplace, se obtiene la solución del sistema:

$$x_1(t) = -\frac{\sqrt{2}}{10}\sin\sqrt{2}t + \frac{\sqrt{3}}{5}\sin 2\sqrt{3}t \quad (9)$$

$$x_2(t) = -\frac{\sqrt{2}}{5}\sin\sqrt{2}t - \frac{\sqrt{3}}{10}\sin 2\sqrt{3}t \quad (10)$$

Los gráficos siguientes muestran el movimiento oscilatorio de cada una de las masas.

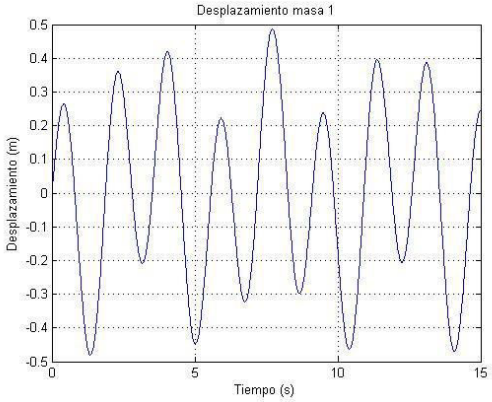


Figura 8. Vibración libre de la masa 1

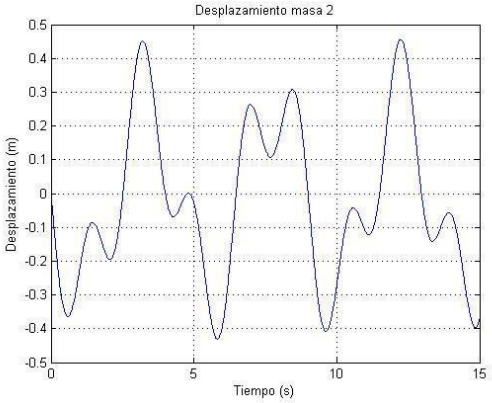


Figura 9. Vibración libre de la masa 2

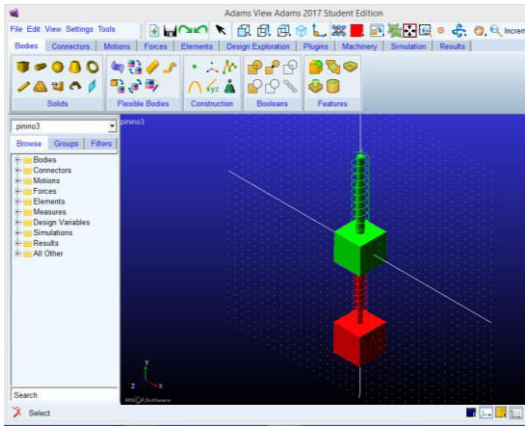


Figura 10. Sistema masa-resorte acoplado

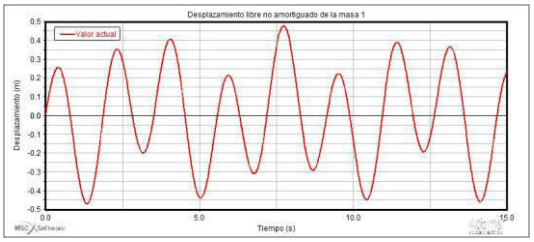


Figura 11. Desplazamiento de la masa 1

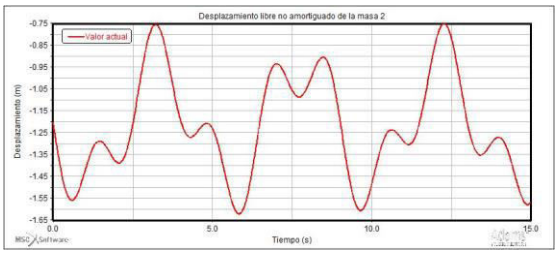


Figura 12. Desplazamiento de la masa 2

Al igual que en el caso anterior, se observa que los resultados obtenidos en MSC Adams en comparación con los que se generan empleando la Transformada de Laplace, son exactamente los mismos.

4. PÉNDULO SIMPLE

La siguiente expresión permite calcular la frecuencia circular natural para oscilaciones pequeñas de un péndulo de longitud l y aceleración de la gravedad g.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{l}} \qquad (11)$$

Para el siguiente caso se considera un péndulo que tiene una barra de longitud igual a 1 m y una esfera de masa 32.6767 kg unida en su extremo, capaz de oscilar en el plano vertical. Se requiere conocer el valor de la frecuencia circular natural, así como de la posición y velocidad del centro de masa de la esfera.

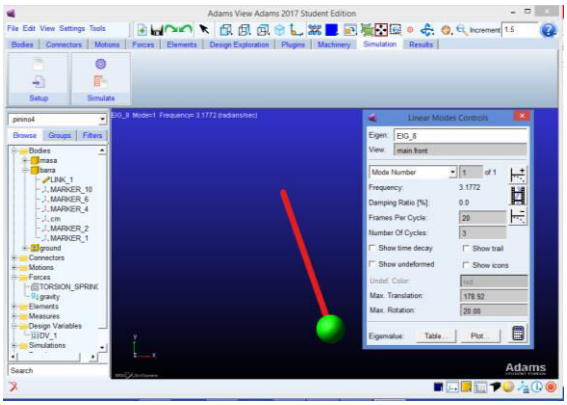


Figura 13. Modelo de un péndulo simple y su frecuencia circular natural

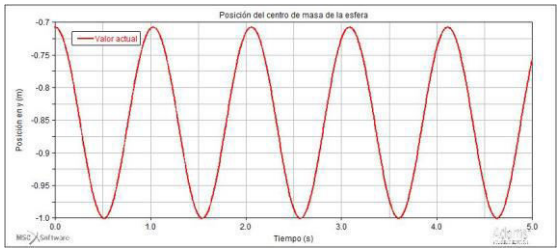


Figura 14. Posición del centro de masa de la esfera

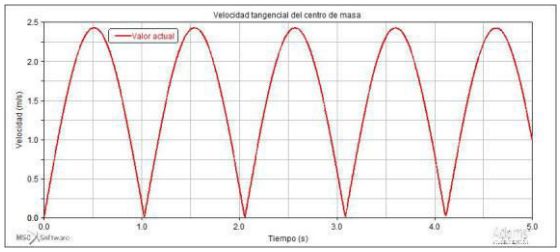


Figura 15. Velocidad del centro de masa de la esfera

El valor calculado de la frecuencia natural circular es de 3.13209 rad/s. Por otro lado, el valor que arroja ADAMS es de 3.1772 rad/s.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación demuestra que los resultados obtenidos al emplear el software MSC Adams en la solución de problemas simples de mecánica de las vibraciones, son exactos en comparación con otros métodos tradicionales de resolución de las ecuaciones diferenciales de movimiento de los sistemas mecánicos de masa-resorte-amortiguador, como lo son el método numérico de Runge-Kutta de orden 4 y la Transformada de Laplace. El modelado de cualquier sistema mecánico puede llevarse a cabo en MSC Adams, simplificando considerablemente la labor de establecer la ecuación diferencial que lo representa, así como la posible compleja solución que conlleva. MSC Adams proporciona una herramienta efectiva y exacta en el modelado de

sistemas mecánicos y su posterior análisis de vibraciones mecánicas. Como trabajo futuro se profundizara su aplicación en sistemas mecánicos reales, que representen un comportamiento dinámico multicuerpo de mucha más complejidad.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Administración de la Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero.

REFERENCIAS

Ahadi, A.,Lidström, P. y Nilsson, K. (2014). "A short Introduction to ADAMS", Division of Mechanics, Department of Mechanical Engineering, Lund Institute of Technology.

Alam, M. N., Akhlaq, A. y Rahman, N. (2015). "Dynamic analysis and vibration control of a multi-body system using MSC Adams", Latin American Journal of Solids and Structures.

Bertini, L., Bucchi, F., Monelli, B. D. y Neri, P. (2018). "Development of a simplified model for the vibration analysis of lawn mowers", International Conference on Stress Analysis, **Vol. 8.**

Chikhale, S. J., Deshmukh, S. P. (2013). "Comparative Analysis of Vehicle Suspension System in Matlab-Simulink and MSC ADAMS with the Help of Quarter Car Model", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology **Vol. 2. ,** No. 10.

Dumitru, N., Dumitru, S., Copilusi, C. y Ploscaru, N. (2016). "Modal Dynamic Analysis of a Mechanism with Deformable Elements from an Oil Pump Unit Structure", International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, **Vol. 10, No.8.**

Li, L. y Li., Q. (2007). "Vibration Analysis Base don Full Multi-Body Model for the Commercial Vehicle Suspension System", International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation, Corfu Island, Greece.

Mohammadpanah, A. (2017). *Learning Dynamics and Vibrations by MSC ADAMS*, disponible en https://www.researchgate.net/publication/320934870.

Moravic, M., Hroncova, D., y Ostertag, O. (2015). "Vibration of Mechanical System Using MSC Adams Software", American Journal of Mechanical Engineering, **Vol. 3,** No. 6.

Sapietová, A. y Dekys, V. (2015). "Dynamic analysis of rotating machine in MSC.ADAMS". Elsevier 20th International Conference: Machine Modelling and Simulations, **Procedia Engineering 136.**

Rao, S. S. (2011). Mechanical Vibrations, Prentice Hall. fifth edition. Upper Saddle River, NJ.

UNA DISCUSIÓN SOBRE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO DE GRIETAS BAJO CARGA DE AMPLITUD VARIABLE CONSIDERANDO EL RETRASO

A DISCUSSION ON CRACK GROWTH SIMULATION MODELS UNDER VARIABLE AMPLITUDE LOADING CONSIDERING THE RETARDATION

Carlos Alexandre J. Miranda[*]; Luiz Carlos H. Ricardo[**]; Rosani M. L. da Penha[***]

[*, ***]Centro de Engenharia Nuclear, IPEN
[**]Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais, IPEN
IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Lineu Prestes 2242 - Cidade Universitária - São Paulo - SP
BRASIL- CEP: 05508-000

Resumen: Algunas de las metodologías utilizadas para obtener el crecimiento de grietas consideran el efecto de retraso en análisis numéricos cuando la vida de fatiga está dominada por el crecimiento de grietas o por la nucleación de grietas muy pequeñas. No siempre la regla de Miner es conservadora. Cuando la carga da fatiga es un espectro complejo, es necesario tener en claro la influencia de las secuencias de carga en el crecimiento de la fisura, principalmente cuando hay altas sobrecargas. Esto se debe a que el comportamiento de fatiga de las estructuras sometidas a cargas de amplitud variable con sobrecargas requiere una estimación de las regiones afectadas plásticamente al frente de la punta de la grieta. El cierre de grietas inducido por plasticidad en condiciones de fatiga y deformación plana es un tema controvertido además de la selección y edición de lo espectro representativo de la carga experimental que se utilizará en la simulación de propagación de grietas. Por lo tanto, la revisión de algunos modelos de retraso bajo cargas de amplitud constantes y variables es para aclarar algunos aspectos de estos problemas.

Palabras clave: *Fatiga, propagación de grietas, retraso, método de los elementos finitos.*

Abstract: Some of the methodologies used to perform the crack advance consider the retardation effect in numerical analyses when the fatigue life is dominated by the crack growth or by the initiation (and growth) of very small cracks. Not always Miner's rule is conservative. When one have a complex fatigue spectrum loading it is necessary to be clear the influence of loading sequences on the crack growth mainly when high overloads are present. This is due to the fatigue behavior of structural components subjected to variable amplitude loading with overloads requires an estimation of the plastically affected regions ahead of the crack-tip. The plasticity-induced crack closure under fatigue and plane strain conditions is a controversial topic besides the selection and editing the representative experimental spectrum loading to be used in the crack propagation simulation. Therefore, the review of some crack retardation models under constant and variable amplitude loadings is necessary to bring some clarification on these issues.

Keywords: *Fatigue, crack propagation simulation, retardation, numerical analysis.*

1. INTRODUCTION

Despite the known deviations, inaccuracies and proven conservatism of Miner's cumulative damage law continues being used in the design of many advanced structures to predict its fatigue, from automotive to nuclear industries.

In those cases of fatigue loaded components containing a flaw under constant stress amplitude fatigue, the crack growth can be calculated by integration of the relation between *da/dN* and ΔK, the so-called Paris-Erdogan Law. However, for complex spectrum loadings, simple addition of the crack growth occurring in each portion of the loading sequence produces results that, very often, are more erroneous than the results obtained using Miner's rule with an *S-N* curve.

When the fatigue life is dominated by the crack growth the retardation tends to cause conservative results using Miner's rule. The opposite effect can occur when the life is dominated by the initiation and growth of small cracks. In these cases, large cyclic strains, which might occur locally at stress raisers due to overload, may pre-damage the material and lower its resistance to fatigue. Some researchers, like Stouffer & Williams (1979), modeled this phenomenon of crack growth retardation through the manipulation of the constants and stress intensity factors in the Paris-Erdogan equation.

It seems that the main reason that the existing models of retarded crack growth are not satisfactory is that these models are deterministic while the fatigue crack growth phenomenon shows strong random features. And more: most of the reported theoretical descriptions of the retardation are based on data fitting techniques, which tend to hide the behavior of the phenomenon. So, if the retarding effect of a peak overload on the crack growth is neglected, the prediction of the material lifetime is usually very conservative (Ditlevsen & Sobczyk, 1986).

It is necessary that the physics of the peak overload mechanisms be better clarified once the retardation is a physically complicated phenomenon. It is affected by a wide range of variables associated with, for instance, loading, metallurgical properties, environment, and it is difficult to separate the contribution of each variable (Wei & Shih, 1974).

2. CRACK PROPAGATION AND PLASTICITY

The stress intensity factor, K, is used to characterize the stress field near a crack tip in an isotropic and elastic material. It is related with the release energy rate $G = d\Pi/dA$ necessary to produce the crack propagation where $d\Pi$ is the potential of energy and A is the crack area. The stress value ahead of the crack tip tends to be higher than the material yield stress and this characterizes the so-called plastic zone which increases in the same ratio that of the crack length (Frost and Dugdale, 1958).

Paris & Erdogan (1963) conducted a revision on the crack propagation approach and discussed the similarity and differences of the current theories comparing their results. They suggested that, for a cyclical load variation, the stress field in the crack tip, for a load cycle, can be characterized by a variation of the stress intensity factor, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, respectively the maximum and the minimum stress intensity factors during the cycle. They proposed also, a power law, Eq. (1), to describe the main part (linear, in Log scale) of the experimental results when plotted as ΔK *vs* da/dN where *C* and *m* are found by experimental data adjustment.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

Fatigue crack initiation and growth under cyclic loading is controlled by the plastic zones that result from the applied stresses and exist in the vicinity (ahead) of a propagating crack and in the wake or flanks of its surfaces. Fatigue in a cracked component under a single overload or variable amplitude loading is significantly influenced by these plastic zones. When modelling the fatigue crack growth rate this is accounted by the incorporation of accumulative damage cycle after cycle and should include plasticity effects. During the crack propagation the plastic zone should grown and the plastic wake will have compressive plastic zones that can help to keep the crack closed.

Prediction of the fatigue behaviour of structural components subjected to overloads and variable amplitude loading requires an estimation of the plastically affected regions ahead of the crack-tip. One of the most widely used plasticity models in fatigue is the Dugdale's yield strip model (Dugdale, 1960). In this model the plastically affected zone (r_y or r_p) is assumed to be small.

The models of Irwin (1953, 1960) and Dugdale (1960) give an idea of the size of the plastic zone but not its shape. The size, in general, is estimated as a circle of certain diameter (r_y or r_p) based on reasoning given in the above models for crack-tip-plasticity. In these models, the effect of the shape of the plasticity affected zones is not taken into account.

Williams (1957) developed a method to obtain the plastic zone shape using the stress components in the radial (r) and circumferential (θ) directions of a mode-1 type of loading. Considering the first terms of each stress expressions (which are dominant near the crack-tip) and the principal stresses, after the simplifying assumptions, the respective plastic zone shape, $r_p(\theta)$, can be found as in the Eq. (2) for the von Mises yield criteria.

$$r_p(\theta) = \begin{cases} \dfrac{K^2}{4\pi\sigma_{ys}^2}\left(\dfrac{3}{2}sin^2(\theta) + (1-2\nu)^2\left(1+\cos(\theta)\right)\right) \\ \dfrac{K^2}{4\pi\sigma_{ys}^2}\left(1+\dfrac{3}{2}sin^2(\theta)+\cos(\theta)\right) \end{cases} \tag{2}$$

The above expressions are associated respectively with the Plane Strain and the Plane Stress conditions.

For the Tresca yield criteria, the expression (3a) and (3b) apply.

Again, the expressions (3a) & (3b) are associated respectively with the Plane Strain and the Plane Stress conditions.

$$r_p(\theta) = \begin{cases} \dfrac{K^2}{2\pi\sigma_{ys}^2}\cos\left(\dfrac{\theta}{2}\right)\sin^2\left(\dfrac{\theta}{2}\right) \end{cases} \tag{3a}$$

Or (the larger one):

$$r_p(\theta) = \begin{cases} \dfrac{K^2}{2\pi\sigma_{ys}^2}\cos\left(\dfrac{\theta}{2}\right)^2\left(1-2\nu+\sin\left(\dfrac{\theta}{2}\right)\right)^2 \\ \dfrac{K^2}{2\pi\sigma_{ys}^2}^2\cos^2\left(\dfrac{\theta}{2}\right)\left(1+\sin\left(\dfrac{\theta}{2}\right)\right)^2 \end{cases} \tag{3b}$$

2.1 Other da/dN laws

The Paris law is valid in the central portion of the da/dN x ΔK experimental data, named Region B, where the crack growth has a constant rate (in Log scale). The Region A is characterized by a threshold value (ΔK_{th}), below which there is no crack growing, and a higher crack growth rate. Idem to the Region C where the material critical K_C limit is approaching, so the crack instability, and there is no practical interest in this region.

However, to take into account one or both extremities of the data, Region A (the lower portion) and Region C (upper portion), and other parameters, some researchers, see for instance Elber (1971), Corbly & Packman (1973) and Murthy et al. (2004), proposed different models, always based on the Paris equation, with additional parameters. Among the extra parameters can be pointed the threshold itself, ΔK_{th}, the material critical Kc value and the stress ratio, $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ (respectively, the minimum and the maximum stress in the stress cycle).

3. THE RETARDATION EFFECT

Rigorously, the Paris law is valid only for constant amplitude loading. Murthy et al. (2004) discuss crack growth models for variable amplitude loading and the mechanisms and contribution to overload retardation. They mention some researchers, which have been developing fatigue crack growth models for variable amplitude loading as, for instance, Elber (1971), Wheeler (1972), Porter (1972) and de Koning (1981).

Corbly & Packman (1973) review and discuss

some aspects of the retardation phenomenon some of which are: (a) With a constant ratio of peak to lower stress intensity the number of cycles to return to non-retarded growth rates increases with increasing peak stress intensity (Hardrarth & McEvily, 1961); (b) Retardation increases with higher values of peak loading, σ_{peak}, for constant values of lower stress levels (Schijve *et al.*, 1962); (c) Low-high sequences cause an initial acceleration of the crack propagation at the higher stress level which rapidly stabilizes (Mcmillan & Pelloux, 1966); (d) If the ratio of the peak stress to lower stress intensity factors is greater than l.5 complete retardation at the lower stress intensity range is observed (Jonds & Wei, 1971); and (e) Negative peak loads cause no substantial influence of crack growth rates at lower stress levels if the values of R > 0 for the lower stress (Crooker, 1971).

3.1 Small Scale Yield Model - SSY

The basic layout of the SSY model has been established by Dill & Saff (1976) and the improvements introduced later by Newman (1981) made this approach applicable to general variable amplitude loading. The SSY model employs the Dugdale (1960) theory of crack tip plasticity modified to leave a wedge of plastically stretched material on the fatigue crack surfaces. The fatigue crack growth is simulated by severing the strip material over a distance corresponding to the fatigue crack growth increment.

In order to satisfy the compatibility between the elastic plate and the plastically deformed strip material, a traction must be applied on the fictitious crack surfaces in the plastic zone ($a \leq x < a_{fict}$), as in the original Dugdale model, and also over some distance in the crack wake ($a_{open} \leq x < a$), where the plastic elongations of the strip $L(x)$ exceed the fictitious crack opening displacements $V(x)$. The compressive stress applied in the crack plastic wake to insure $L(x)=V(x)$ are referred to as the contact stresses. Figure 1 shows schematically these terms and how the fatigue crack growth is simulated using the strip material.

The importance in the determination of materials properties like crack opening and closing stress intensity factor are discussed by Ricardo et al. (2002a). The development of crack closure mechanisms, such plasticity, roughness, oxide, corrosion, and fretting product debris, and the use of the effective stress intensity factor range, has provided an engineering tool to predict small and large crack growth rate behavior under service loading conditions.

The application of linear elastic fracture mechanics, i.e. the stress intensity factor range, ΔK, to the "small or short" crack growth have been studied for long time to explain the effects of nonlinear crack tip parameters. The key issue for these nonlinear crack tip parameters is crack closure concept, using the plasticity induced approach in the models considering normally plane stress or strain effects. It founded crack propagation theories and allowed the development of practical life prediction for variable and constant amplitude loading, as experienced by modern commercial aircrafts. Numerical analysis using finite elements has played a major role in the stress analysis of crack problems. Swedlow (1965) was one of the first to use finite element method to study the elastic-plastic stress field around a crack.

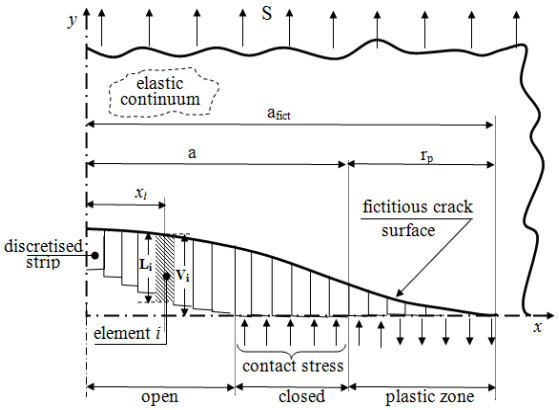


Fig. 1. Schematic crack growth using the strip material (SSY Model)

4. APPLICATION

Discussing the relation between short and long cracks Schijve (1979) presented also the significance of crack closure and growth on fatigue cracks under services load histories. The goal of the prediction models is to arrive at quantitative results of fatigue crack growth in terms of

millimeters per year or some other service period. Such predictions are required for safety and economy reasons for aircraft and automotive parts or other application.

Sometimes the service load time history (variable amplitude loading) is much similar to constant amplitude loading, including mean load effects. In both cases quantitative knowledge of crack opening stress level S_{op} is essential for crack growth predictions, because ΔK_{eff} is supposed to be the appropriate field parameter for correlating crack growth rates under different cyclic loading conditions.

The correlation of crack growth data starts from the similitude approach based on the ΔK_{eff} (same ΔK_{eff} cycles will produce the same crack growth increments). The application of ΔK_{eff} to variable amplitude loading require prediction of the variation of S_{op}, during the variable amplitude load history, which for the more advanced prediction models implies a cycle by cycle prediction.

However, the application of ΔK_{eff} concept is considerably complicated by two reasons: small cracks and threshold ΔK values (ΔK_{th}). Small cracks can be significant because in many cases a relatively large part of the fatigue life is spent in the small crack length regime. The threshold problem is particularly relevant for fatigue under variable amplitude spectrum, if the spectrum includes many "small" cycles. It is important to know whether the small cycles do exceed a threshold value and in which extension it will occur.

4.1 Numerical analysis hints

Newman (1974, 1976), Newman & Armen (1975) and Ohji et al. (1975) were the first to conduct two-dimensional analysis of the crack growth process. Their results under plane stress conditions were in good agreement with Elber's (1971) experimental results, and showed that crack opening stresses were a function of the stress R ratio and the stress level (σ_{max}/σ_0), where σ_0 is the flow stress considered here as the average between σ_{ys} and σ_u.

Blom & Holm (1985), Fleck (1986) and Fleck & Newman (1988) studied crack growth and closure under plane-strain conditions and found that cracks did close but the cracks opening levels were much lower than those under plane stress conditions considering same loading condition.

Matos & Nowell (2008) present a review of the plasticity-induced fatigue crack closure under plane strain conditions and mention that there are controversial topics concerning the mechanics of crack propagation.

In the crack propagation analysis one should take into account, as minimum, among others: (a) the adopted constraint (plane stress or plane strain); (b) the node release scheme (at the maximum load or at the minimum load in the cycle); (c) the so-called 'target' (crack opening and/or crack closing) and as it will be verified (by contact element, by compliance method or by displacement method). And last but not least, the adopted element type in the discretization (triangle or quadrilateral, usually with linear interpolation).

4.2 A numerical example

Ricardo et al. (2002b) present an example of small scale yielding under constant amplitude loading. A compact tension specimen, as per ASTM 647-E95a (ASTM, 1995), Fig. 2, was modeled using a commercial finite element code Ansys version 6.0 (Ansys, 2002). Taking into account the geometry and loading symmetry only a half of the specimen was modeled and adequate symmetry conditions were applied. Figure 3 shows the model.

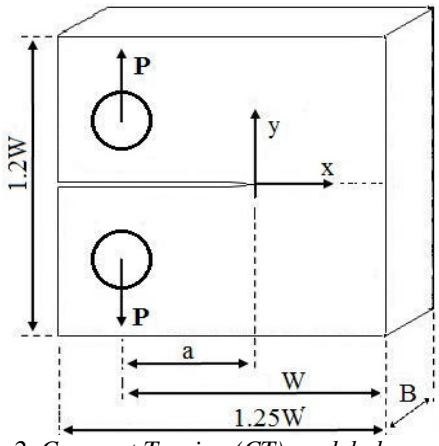


Fig. 2. Compact Tension (CT) modeled geometry

As loading, a value of stress intensity factor K = 19 MPa√m was applied as an equivalent force using the Eq. (4), in the point indicated in Fig. 3.

$$P_{\max} = KBW / f(a/w) \quad (4)$$

P_{max} is the maximum applied load; B the specimen thickness; a the crack length; W the specimen width; a/w the crack length to width ratio and $f(a/W)$ is the characteristic function of the specimen that can be found explicitly in ASTM 647-E95a.

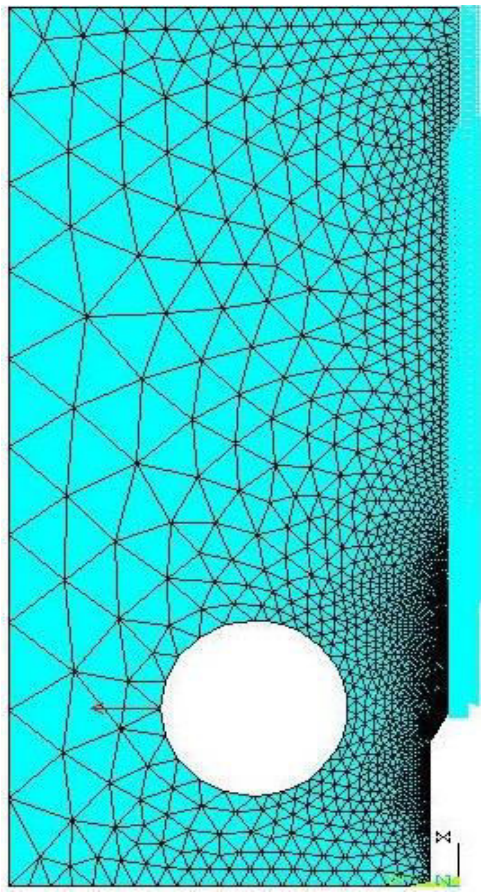


Fig. 3. Half CT Model

Figures 4 and 5 show an example of post-processing, in terms of the stresses in the crack tip region which allow the calculation of the stress intensity factor. In Fig. 4 the region far from the crack tip (in the x-direction) was cut and Fig. 5 shows a rotated zoom in the stress field near the crack tip.

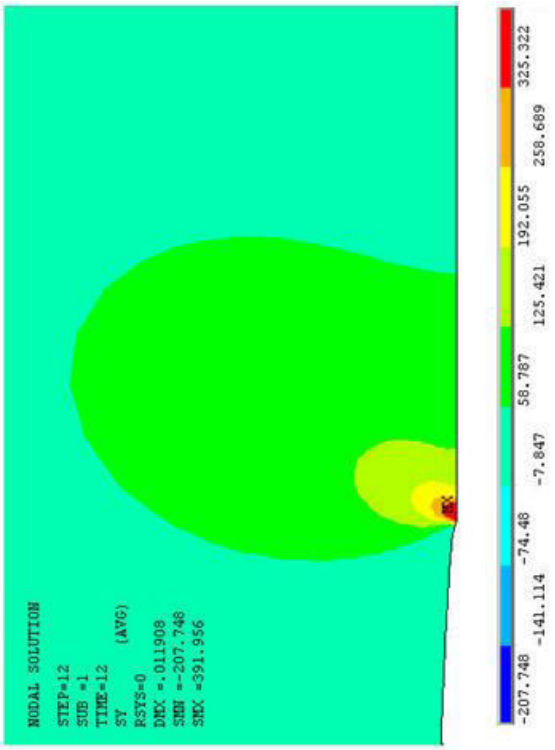


Fig. 4. Example of stress field in the Half CT Model

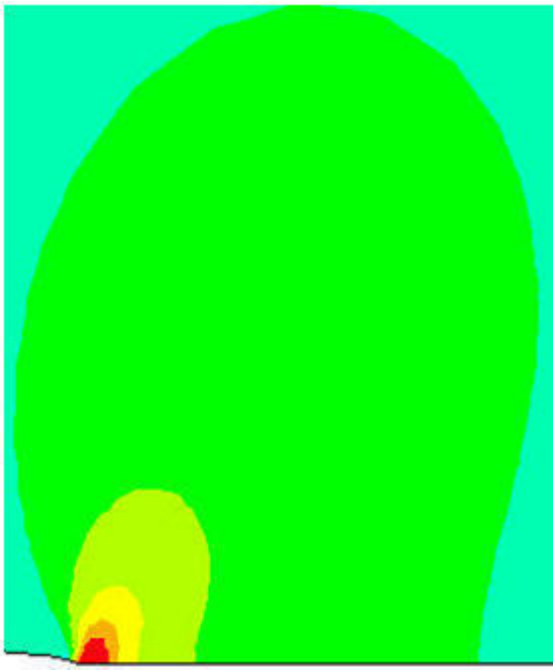


Fig. 5. Example of stress field around the crack tip in the Half CT Model (Zoom and no 'MX' symbol)

5. VARIABLE AMPLITUDE LOADING

It is well-known that data and models that characterize the fatigue behavior of materials and structures under constant amplitude loading may not be appropriate or sufficient to adequately assess their fatigue performance under irregular variable amplitude loading. Basic research is conducted under use of simplified load sequences such as single overload or underload or block loading with alternate mean loads.

Heuler & Klätschke (2005) discuss the procedure and how the generation of standards loadings can help the development of structures and components considering crack growth phenomenon under variable amplitude loading.

Phenomena like crack growth retardation or acceleration are described making reference to base-line constant amplitude data. It is generally agreed, however, that real life load spectra also need to be applied in order to get a realistic picture of the relevance and significance of the mechanisms involved.

Standardized load sequences or Load–time Histories (SLH's) presently available provide an appropriate selection of load sequences to be used in the development of components, but they can also advantageously be used for other tasks.

With the need for optimum light-weight design, originally the aircraft industry was the main driver for these efforts. Two of the most well known SLH's are the TWIST (Schütz *et al*. 1973) and FALSTAFF (Aircher et al., 1976) sequences for transport and fighter aircraft, respectively, which have been and are still being applied for numerous studies on materials, joints and other structural elements. For automotive applications, the CARLOS (Schütz et al, 1999) series of SLH's have been presented including the very recent load sequence for car trailer couplings, CARLOS-TC.

It is generally agreed that the structural load variations should be characterized in the time domain since in most cases the range (or amplitude) of a load, stress or strain cycle and its respective max or mean value can be considered as fatigue-relevant. Furthermore, the sequence or mixing of load cycles of different ranges and mean values must not be neglected. Analyses in the frequency domain give insight into the frequency content of a load signal which is particularly useful for flexible structures, but do not deliver the above-mentioned values.

Many structural loading environments can be described as sequences of different modes (ten Have, 1989) which may be a particular flight, driving a car on certain road types, a sea state of a given severity, etc. These modes of operation contain load cycles of different, but typical magnitudes and frequencies. Often distinct patterns of grouped load cycles can be distinguished. They are called a loading event on element, such as braking or cornering of a car, different flight phases or maneuvers of an aircraft.

In the discussion of the importance of crack growth under variable amplitude loading, Youb & Song (1994), using results obtained from single edge crack bending (SEB), mentioned that Schijve (1979) was one of the first works covering this topic. Kikukawa et al. (1992) have extensively measured crack opening behavior under various random loadings and reported that crack opening point is controlled by the maximum range-pair load cycle ("the largest load cycle") in a random load history and is identical to the crack opening result of constant amplitude loading corresponding to the largest load cycle. Based on this crack opening behavior, they proposed a simple prediction procedure for crack growth under random loading.

The phenomenon of plasticity-induced fatigue crack closure under plane strain conditions is one of the most controversial topics concerning the mechanics of crack propagation. No general consensus exists among the scientific community concerning the physical mechanism for crack closure under plane strain conditions. One of the problems is on how to prepare the mesh and the procedure used in crack propagation.

According to Fleck (1986) the source of discontinuous closure appears to be a residual wedge of material on the crack flanks, located just ahead of the initial position of the crack tip. More recently Wei and James (2000) reported that after growing a virtual plane strain fatigue crack for a

few cycles, there is no contact in the region immediately behind the crack tip and the contact pressure along the crack faces is discontinuous. Zao et al. (2004) modeled a CT specimen under plane stress and plane strain. They did not observe plasticity-induced crack closure under plane strain during steady state crack growth under cyclic tension, although they found significant levels of closure under plane stress.

Chermahini (1986) present some crack propagation analyses using 3D model of the Middle-Crack Tension Specimen under plane strain conditions to determine the crack opening level. On the specimen surface and in the mid-plane the crack-opening stress levels tend to be two-dimensional solutions for plane stress and plane strain conditions, respectively. The model was prepared using layers of elements, considering the size of the smaller elements in the reverse plastic zone computed by Irwin equation and then increasing the size of the hexahedron elements until arriving the region where the results will not affect the stress level in the crack propagation area. Spring elements were used for node release, cycle after cycle, as in Newman (1981).

Wu and Ellyin (1996) had used a truss element together with pairs of contact elements and the element death option for crack propagation simulation. This technique used in plane stress and plane strain models is usual in commercial finite element codes. The element death option was incorporated to remove truss elements. With their approach, a node can be released any time during a load cycle irrespective of the magnitude of the deformation caused by the release of the node. Consequently, fewer problems with convergence were encountered and also several nodes could be released simultaneously if desired.

Solanki et al. (2003) present a review of crack propagation in plane stress and plane strain conditions. A M(T) specimen was modeled with an externally induced T-stress to observe the subsequent change in closure levels under plane-strain. The T-stress was induced by applying tractions parallel to the crack in addition to the conventional tractions perpendicular to the crack.

Note: More details on this subject, crack propagation simulation considering the retardation and variable amplitude loading, can be found in a recent review (Ricardo & Miranda, 2016) from which the present text in a reduced version.

6. CONCLUSIONS

A review of some crack retardation models under constant and variable amplitude loadings was provided along the text together with the small scale yield model using finite element method. The Miner's rule crack initiation approach can be conservative in some applications, in special if the structures should develop cracks under variable amplitude loading. The improvement in the computers' processing and storage capacity makes strong the possibility to increase the size of models and decreasing the element size making more realistic the crack propagation simulation using contact analysis for example. Together with the numerical improvement, it will be necessary, in the near future, to perform more tests to validate the numerical models hoping that the correlation between numerical and experimental results be improved.

REFERENCES

Aircher, W., Branger, J., van DijK, G. M., Ertelt J., Hück, M. & de Jonge J. B. (1976). *Description of a Fighter Aircraft loading for Standard for Fatigue Evaluation FALSTAFF* Common Report of FCW Emmen, LBF, NRL, IABG.

Ansys Inc. (2002), Ansys Version 6.0, USA.

ASTM (1995), Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, E647 –95a.

Blom, A. F. & Holm. D. K. (1985). *An Experimental and Numerical Study of Crack Closure.* Eng. Fracture Mech. No 22, p. 907-1011.

Chermahini R. G. (1986). *Three-dimensional elastic- plastic -finite-element analysis of fatigue crack growth and closure*. PhD Thesis, Old Dominion University, Norfolk, VA.

Corbly, D. M. & Packman, P. F. (1973). *On The Influence of Single and Multiple Peak*

Overloads on Fatigue Crack Propagation in 7075-T6511 Aluminum, Eng. Fracture Mech., Vol. 5, pp. 479-497.

Crooker, T. W. (1971). *Effect of T. C. Cycling on Fatigue Grade Growth in High Strength Alloys*, NRL Report 7220.

de Koning, A. U. (1981). *A Simple Crack Closure Model for Predictions of Fatigue Crack Growth Rates Under Variable Amplitude Loading*, ASTM STP 743, p. 63-85.

Dill, H. D. & Saff, C. R. (1976). *Spectrum Crack Growth Prediction Method based on Crack Surface Displacement and Contact Analyses, Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads*, ASTM STP 595, Philadelphia, PA: ASTM, p. 306–19.

Ditlevsen, O. & Sobczyk, K. (1986). *Random Fatigue Crack Growth with Retardation*, Eng. Fracture Mech., Vol. 24, No 6, p. 861-878.

Dugdale, D. S. (1960). *Yielding of Steel Sheets Containing Slits*, J. Mech. Phys. Solids, p. 100-104, nº 8, USA.

Elber, W. (1971). *The Significance of Fatigue Crack Closure*, ASTM STP 486, p. 230- 242.

Fleck N. A. (1986). *Finite-element analysis of plasticity induced crack closure under plane strain conditions*. Eng. Fract. Mech., Vol. 25, p. 441-449.

Fleck, N. A. & Newman, J. C. Jr. (1988). *Analysis of Crack Closure Under Plane Strain Conditions*, ASTM STP 982, p. 319-341, USA.

Frost, N. E. & Dugdale, D. S. (1958). Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 6, p. 925.

Hardrarth, H. F. & McEvily, A. T. (1961). Proc. Crack Propagation Simposium, Vol. 1, Cranfield,

Heuler, P. & Klätschke, H. (2005). *Generation and Use of Standardized Load Spectra and Load-Times Histories*, Int. Journal of Fatigue, Vol. 27, p. 974-990.

Irwin, G. R. (1953). Journal of Applied Mechanics, Vol. 79, p. 361.

Irwin, G. R. (1960). Journal of Basic Engineering, Trans., ASME, series D, Vol. 82, No 2, p. 417.

Jonds, D. & Wei, R. P. (1971). *An Exploratory study of delay effects in fatigue crack growth*, Int. J. Fracture Mechanics, Vol. 7.

Kikukawa M., Jono M., Kondo Y. & Mikami S. (1982). *Fatigue Crack Closure and Estimation Method of Crack Propagation Rate under Stationary Varying Loading Conditions Including Random Loading*. Trans. Jpn Soc. Mech. Engrs, Vol. 48, p. 1496-1504.

Matos, P. F. P. & Nowell, D. (2008). *Numerical Simulation of Plasticity Induced Fatigue Crack Closure with Emphasis on the Crack Growth Scheme: 2D and 3D Analyses*, Eng. Fract. Mech., Vol. 75, p. 2087-2114.

Mcmillan, J. C. & Pelloux, R. M. (1966). ASTM STP 415, p. 505.

Miner, M. A. (1945). *Cumulative Damage in Fatigue*, J. of Applied Mechanics, ASME, Vol. 12, USA, p. A159-A164.

Murthy, A. R. C.; Palani, G. S. & Iyer, N. R. (2004). *State of Art Review on Fatigue Crack Growth Analysis under Variable Amplitude Loading*, IEI Journal, p. 118-129.

Newman J. C. Jr. (1974). *Finite Element Analysis of Fatigue Crack Propagation, Including the Effect C-(T) of Crack Closure*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute.

Newman, J. C. Jr. (1976). *A Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure.* ASTM 490, p. 281-301.

Newman Jr, J. C. (1981). *A Crack Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth under Aircraft Spectrum Loading*. In: Chang JB, Hudson CM, editors. Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading, ASTM STP 748, Philadelphia, PA: ASTM; p. 53–84.

Newman, J. C. Jr.; Armen, H. Jr. (1975). *Elastic-Plastic Analysis of Fatigue Crack Under Cyclic Loading*, AIAA Journal, No 13, p. 1017-1023.

Ohji, K.; Ogura, K. Ohkubo, Y. . (1975). *Cyclic Analysis of a Propagation Crack and its Correlation with Fatigue Crack Growth.* Eng. Fracture Mech., No 7, p. 457-464.

Paris, P. C. & Erdogan, F. (1963). Journal of Basic Engineering, No 85, p. 528.

Porter, T. R. (1972). *Method of Analysis and Prediction of Variable Amplitude Fatigue*

Crack Growth, Eng. Fracture Mech., Vol. 4, No 4, p.717-736.

Ricardo, L. C. H., Miranda C. A. J. (2016). *Crack simulation models in variable amplitude loading - a review,* Frattura ed Integrità Strutturale, Vol. 35, p. 456-471; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.35.52.

Ricardo L. C. H., Andrade, A. H. P. & Topper T. H. (2002a). *Experimental Procedure to Estimate the Fatigue Life of a Component under Variable Amplitude Loading*. In: Blom, A. F (Ed.), Fatigue 2002, Emas Publishing; Vol. 4, p. 2293-2300, Stockholm, Sweden.

Ricardo, L. C. H, Pimenta, P. M., Spinelli D. & Andrade, A H. P. (2002b). *Crack Closure Simulation by Finite Element Method*. In: Blom, A. F (Ed.), Fatigue 2002, Emas Publishing, Vol. 4, p. 2863-2869, Stockholm, Sweden.

Schijve, J.; Brock, D. & de Rigle, P. (1962). NLR, Report M2094, Amsterdam.

Schijve, J. (1979). *Observations on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation under Variable Amplitude Loading*, ASTM STP 595, p. 3-23.

Schütz, D., Klätschke, H., Steinhilber, H., Heuler, P. & Schütz, W. (1999). *Standardized Load Sequences for Car Wheel Suspension Components, Car Loading Standard-CARLOS*, LBF - Report No FB-191.

Schütz, D., Lowack, H., de Jonge J. B., Schijve, J. (1973). *A Standardized Load Sequence for Flight Simulation Tests on Transport Aircraft Wing Structures*, LBF Report FB 106, NRL-Report TR 73.

Solanki K., Daniewicz S. R., Newman Jr J. C. (2003). *Finite element modelling of plasticity-induced crack closure with emphasis on geometry and mesh refinement effects*. Eng. Fract. Mech, Vol. 70: p. 1475–89.

Stouffer, D. C. & Williams, J. F. (1979). *A Method for Fatigue Crack Growth with a Variable Stress Intensity Factor.* Eng. Fracture Mech., Vol. 11, p. 525-536.

Swedlow, J. L. (1965). *Effectc and Plastic Flow in Cracked Plates*, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, USA.

ten Have, A. A. (1989). *European Approaches in Standard Spectrum Development*. In: Potter J. M., Watanable R. T., editors, Development of Fatigue Loading Spectra , ASTM-STP 1006, ASTM, p. 35-75.

Wei, R. P. & Shih, T. T. (1974). *Delay in Fatigue Crack Growth*, Int. Journal Fracture, 10, p. 77-85.

Wei L. W., James M. N. (2000). *A study of fatigue crack closure in polycarbonate ct specimens*. Eng. Fract. Mech., Vol. 66, p. 223–42.

Wheeler, O. E. (1972). *Spectrum Loading and Crack Growth*, Transactions of the ASME Series D', Journal of Basic Engineering, Vol 94, p. 181-186.

Williams, M. L. (1957). *On The Stress Distribution at Base Stationary Crack*, J. Appl. Mech., No 24, p. 111-114.

Wu J, Ellyin F. (1996). *A study of fatigue crack closure by elastic–plastic finite element analysis for constant-amplitude loading*. Int. J. Fract., Vol. 82, p. 43–65.

Youb, Y. & Song, J. H. (1994). *Fatigue Crack Closure and Growth Behaviour Under Random Loading*, Eng. Fracture Mech., Vol. 49, No 1, p. 105-120.

Zhao L. G., Tong J., Byrne J. (2004). *The evolution of the stress–strain fields near a fatigue crack tip and plasticity-induced crack closure revisited*. Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 27, 1, p. 19-29.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

UNA REVISIÓN SOBRE LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA EN LA REGIÓN DE INTENSIDAD DE TENSIÓN UMBRAL CONSIDERANDO LAS INFLUENCIAS DEL CIERRE DE GRIETA Y DE LA RELACIÓN R

A REVIEW ON FATIGUE CRACK PROPAGATION IN THE THRESHOLD STRESS INTENSITY REGION CONSIDERING CRACK CLOSURE AND THE R-RATIO INFLUENCES

Carlos Alexandre J. Miranda[*], Luiz Carlos H. Ricardo[**], Luiz Felipe F. Ricardo[***], Rosani M. L. da Penha[****]

[*,****]Centro de Engenharia Nuclear, IPEN
[**]Centro de Ciências e Tecnologia dos Materiais, IPEN
IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Lineu Prestes 2242 - Cidade Universitária - São Paulo - SP
BRASIL- CEP: 05508-000
[***]Departamento de Metalurgia e Materiais, UFRJ
UFRJ – Universidade Federal do Rio Janeiro
Cid. Universitária - Centro de Tecnologia, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, CEP: 21941-972

Resumen: La propagación de grietas generalmente se describe por una relación/curva con tres regiones o regímenes de crecimiento de grietas, llamados A, B y C. La región B muestra una variación lineal en escalas logarítmicas, la llamada ley de Paris. La tasa de propagación de grietas está influenciada por muchos factores, principalmente en la región A. Se presenta una revisión de la propagación de grietas por fatiga con énfasis en los parámetros que influyen en la intensidad de tensión umbral, ΔK_{th}, región A. Este valor depende de variables tales como el material en sí, las condiciones de prueba, la relación R, el medio ambiente, la temperatura y el cierre de grietas, entre otros. El enfoque principal en esta revisión es el efecto del cierre de grietas y la relación R en el valor ΔK_{th}. Algunos modelos que incluyen el efecto del ambiente y las influencias de temperatura también se mencionan brevemente.

Palabras clave: *Fatiga, propagación de grietas, ambiente, intensidad de tensión umbral.*

Abstract: Crack propagation is usually described by a relationship/curve with three regions or crack growth regimes, named A, B and C. Region B shows a linear variation on log scales, the so-called Paris power law. Mainly in the region A the crack propagation rate is influenced by many factors. A review of fatigue crack propagation with emphasis on the parameters that influence the threshold stress intensity, ΔK_{th}, region A, is presented. This value is dependent on such variables as the material itself, the test conditions, the *R*-ratio, the environment, temperature and crack closure, among other. The main focus in this review is the effect of crack closure and R-ratio on ΔK_{th} but models that include the effect of the environment and temperature influences are also mentioned.

Keywords: *fatigue, threshold stress intensity factor, environment, crack propagation.*

1. INTRODUCCIÓN

Modern defect- tolerance design approaches to fatigue are based on the premise that engineering structures are inherently flawed. The useful fatigue life then is the time or the number of cycles to propagate a dominant flaw from an assumed or measured initial size to a critical dimension. In most metallic materials, catastrophic failure is preceded by a substantial amount of stable crack propagation under cyclic load conditions. The rates at which these cracks propagate for different combinations of applied stress, crack length and geometric conditions of the cracked structure, and the mechanisms which influence the crack propagation rates under different combinations of mean stress, test frequency and environment, are issues of practical interest (Suresh, 1991).

Crack propagation is usually described by a relationship/curve with three regions or crack growth regimes, named Regions A, B and C. The so-called Paris power law relationship can be applied to the region B that shows a linear variation of log *da/dN versus* log *ΔK*. In the upper region (C) the applied toughness approaches the material fracture toughness and in the lower region (A) is characterized by the threshold value, ΔK_{th}, where below it there is no crack growth. Several parameters/variables can have influence in this curve specially on the threshold region.

This work presents a review of fatigue crack propagation with emphasis on the parameters that influence the threshold stress intensity, ΔK_{th}, value. This threshold value is dependent on such variables as the material itself, the test conditions, the *R*-ratio, the environment and crack closure, as discussed by McEvily (1996). The main focus in this review is the effect of crack closure on ΔK_{th},. Some models that include the effect of crack closure and R-ratio on ΔK_{th}, are reviewed. Some theories that offer explanations other than crack closure for changes in ΔK_{th} will also be mentioned.

2. THE THRESHOLD REGION

The fatigue crack growth (FCG) threshold, ΔK_{th}, is that asymptotic value of ΔK at which the crack propagation rate, *da/dN*, approaches zero. Figure 1, adapted from McEvily (1996), shows this crack growth curve in Log scales showing the three mentioned regions. For most materials an operational, although arbitrary, definition of ΔK_{th} is given as that range of the alternating stress intensity, ΔK, value which corresponds to a fatigue crack growth rate of 10^{-10} m/cycle.

The curve itself (Fig. 1) is a function of *R* load ratio and it is usually drawn on a log-log scale. Cracked materials are only superficially elastic. As theoretically the stresses immediately ahead of the crack tip tends to infinite there is always plasticity in a region very near the crack tip. Under LEFM this region is so small that it does not affect the overall cracked components stress distribution. Larger scale plasticity is explicitly described by elastic–plastic formulations such as the *J*-integral or the crack tip opening displacement (CTOD). On this subject see, for instance, (Maneschy, 1998).

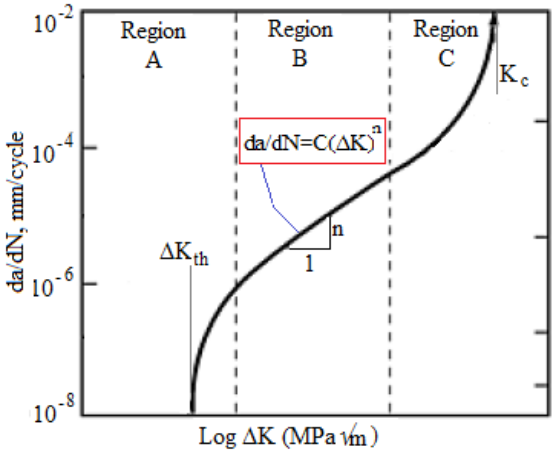


Fig. 1. Fatigue crack growth curve

The variables *K* and *J* are, however, closely related under small scale yielding conditions. The additional work involved in using *J* has not appeared to yield an improvement in predictive ability under near-threshold conditions except in special cases. Figure 2 shows some experimental data for the 2024- T3 aluminum alloy (from various sources) with the correlation (line) of da/dNxΔK obtained using the by Paris & Erdogan (1963) law.

The earliest studies of fatigue (Woehler, 1860), were concerned with the failure after a number of

loading cycles. At that time researchers did not isolate crack growth as a separate phenomenon, before rupture. The approach to evaluate crack growth is simple for long cracks and bypasses the unknown details of crack tip atomistic processes.
For these 'long cracks' it is possible to draw the mentioned curve of da/dN vs. ΔK, Fig. 1.

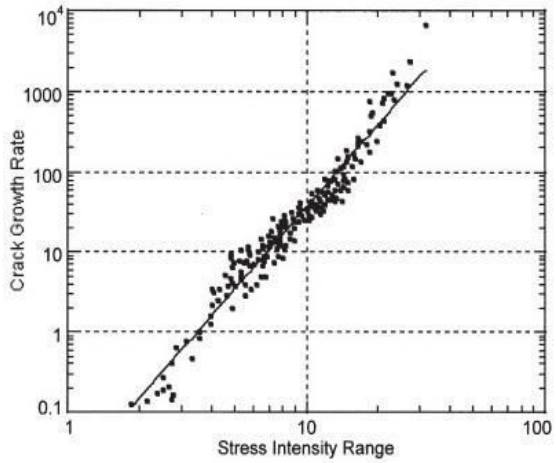


Figure 2: Data for 2024-T3 aluminum from various sources (Paris & Erdogan, 1963).

Nowadays, with the tools of Fracture Mechanics (specifically LEFM) it is possible to analyze how cracks propagate under cyclic load. Several studies try to simulate how cracks propagate under in a large scale plasticity regime, however this will not be mentioned in this review work.

Fig. 1 suggests that the threshold for crack propagation may not be an intrinsic part of the growth (e.g. Paris) relation. For any given material, thresholds are apt to vary more with changing test conditions than do the Paris constants (c, m). But, within the threshold region, extrinsic effects seem to modify the value of an *intrinsic* threshold. These *extrinsic* effects have been embraced under the heading of 'crack closure'.

As defined by Elber (1971), when closure is present, the effective stress intensity range is not the applied maximum stress intensity minus the applied minimum stress intensity, but rather the applied maximum stress intensity minus a closure stress intensity.

The growth of small cracks is even more complicated. It is usual, the propagation of small cracks, within the threshold region, be fitted with a spline of local small-crack Paris relations defining the mean value of the growth rate for the given conditions (Paris *et al*., 1961) and (Chen, 1996).

3. EFFECT OF CRACK GEOMETRY

Considering a small superficial crack the threshold region in metals is generally associated with a reversed-shear mode of growth which at least implies a mode II component. At the same time, plasticity is largely confined to select crystallographic planes, e.g. {111} in Fe–Ni alloys (Suresh and Ritchie, 1984).

This gives rise to a faceted fracture surface. Since growth takes place by a shear mechanism on planes inclined to the mode I stress plane, a certain amount of mode II displacement is expected. If this were unreversed, as might happen in a tensile overload, registry of the peaks and troughs between the upper and lower crack faces could be lost and the peaks would contact each other before the crack fully closed.

At stress intensity ranges near the threshold, a large oxide buildup is likely. Several works on this subject are mentioned in Liaw (1989) and Kren *et al*. (1997). The presence of this oxide, believed to be due to fretting, is thought to increase the crack opening stress (Stewart, 1980) and (Dubey *et al*., 1997). At very low fatigue loads, oxide, and at higher loads, misaligned facets act as wedges reducing the effective stress intensity range by preventing the crack from closing. These effects are called, respectively, oxide- and roughness-induced crack closure.

In the region near to the fatigue threshold, the stress ratio exerts a strong effect on the crack closure level. Environmental effects similarly reach a maximum at stress intensity ranges near threshold but then diminish (Stewart, 1980), (McEvely and Ritchie, 1998).

4. CRACK CLOSURE MODELS

The concept of crack closure was proposed by

Elber (1971) and it has been widely used to explain the influence of R load ratio on FCG (Cooke & Beevers, 1973), Liaw *et al*., 1982). It has been realized for a long time that the degree of crack closure was higher at lower R (Robinson and Beevers, 1973) while it may be negligible at higher R values (i.e., R > 0.7) (Walker, 1970), (Mishra *et al*., 1997) and (Ding *et al*., 2005).

On this subject, the influence of *R ratio,* Walker (1970) studied two aluminum alloys, Mishra *et al*. (1997) studied the environment influence while Ding *et al*. (2005) considered the temperature influence. As a result, instead of the conventional ΔK, the FCG rate was correlated with the effective stress intensity factor range ΔK_{eff}. If K_{max} is maximum stress intensity factor and K_{cl} is the stress intensity when crack is closed, then ΔK_{eff} is defined as:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl} \quad (1)$$

Since then, several crack closure mechanisms have been defined that include the effect of R, environment, temperature and crack growth mode. Stewart (1980) and Kawai (1982) reported that air humidity, corrosive and other gaseous environments provided additive contributions to the effect of R on FCG. Suresh and Ritchie (1983) ascribed the influence of R on near-threshold fatigue behavior of a pressure vessel steel in aqueous, moist and dry gaseous environments to a crack closure mechanism in the form of crack face oxidation products. In addition, Liaw *et al*. (1983) and Liaw & Logsdon (1985) reported that the R-effect varied with temperatures in both CrMoV and pressure vessel steels, which was rationalized by the concepts of roughness and oxide-induced crack closure. Salivar *et al*. (1989) highlighted the significance of oxidation in explaining the R-effect for the near-threshold FCG behavior of Ti–8Al–1Mo–1V at elevated temperatures.

Other researchers also studied the influence of the environment and temperature together with the *R-ratio* on da/dN rate and ΔK_{th} value. Among them can be cited: (a) environment – True-Hwa & Wei (1983), Jones (1984), Marrow *et al*., 1991) and (Zhu *et al*., 2000) and (b) temperature) – Yoder *et al*. (1983) and Zhihong *et al*. (2011).

Besides the environment and temperature influence, it has been found that the effect of R on da/dN and ΔK_{th}, depends also on: (a) microstructures – (Schmidt & Paris, 1973), (Ishihara, 1983), (King, 1987), (da Fonte *et al*., 2003), (Shademan *et al*., 2004) and (Oberwinkler, 2011), (b) test frequency – (Chen *et al*., 1992) and (c) loading mode – (Shanyavsky *et al*., 1995), (Maddox, 1995), Sanders *et al*., 1999) and (Zheng & Powel, 1999).

Saxena & Radhakrishnan (1999) discussed the R-effect of product thickness on FCG in a quaternary Al–Li alloy, and ascribed changes with thickness to roughness-induced crack closure. Morrissey *et al*. (1999) also reported fatigue strength increased with increasing frequency at lower R.

Dowson *et al*. (1992) argued that the apparent R-effect observed for long through cracks could not be transferred to the short crack regime.

Tokaji *et al*. (1990) paid attention to the occurrence of a stage I region of small crack growth at various R values, and found that a stage I region was not observed at a R of zero while both stages I and II occurred at R values of -1 and -2 in an aluminum alloy. Recently, a modest effect of R was observed on small crack growth rates in the Ti–6Al–4V alloy when plotted as a function of crack size by Caton *et al*. (2012), while no discernible effect of R is presented when da/dN are plotted versus ΔK (Caton *et al*., 2012) and (Jha *et al*., 2013).

Physically, maybe, it is more significant to focus on the R-effect in different stages of small crack growth, as pointed out by Tokaji *et al*. (1990). It is known that the crack closure is gradually developed after the onset of small crack propagation in aluminum alloys (Morris & Buck, 1977), (McEvely & Minakawa, 1984), (Ritchie *et al*., 1988) and in general (McEvely & Minakawa, 1984), (Zhang *et al*., 2005).

5. PSYSICAL MECHANIMS

The mechanisms responsible for a R-effect on FCG were also interpreted in terms of energy, cyclic deformation and fracture modes at crack tip. Ritchie and Knot (1973) ascribed mean stress

sensitivity in steel to the change of fracture mechanisms which included ductile striations, and short periods of void-coalescence or intergranular fracture. Kanazawa and Machida (1975) considered the absorbed hysteresis energy per stress cycle at the crack tip to develop a R-dependent FCG model. Ritchie (1977) related higher da/dN and lower ΔK_{th}, in an ultra-high strength steel with increasing R, to cyclic hardening behavior.

Nunomura and Fukui (1978) argued that the R-effect was related to the accumulated plastic strain rate during crack propagation. Shimojo *et al*. (1993) reported the fresh surface area produced in each fatigue cycle was independent of R at a given da/dN in the Paris regime. They concluded that the shape of crack tip at both the maximum, K_{max}, and the minimum stress intensity factor, K_{min}, was independent of R.

Furukawa *et al*. (1998), Uchida *et al*. (1999) and Ruckert *et al*. (2011) evaluated the influence of R by the measuring striation height and spacing on the fracture surface. Iost (1991) concluded that transition of fracture mode from ductile striation (at higher R) to cyclic cleavage (at lower R) was responsible for the effect of R on the m – ln C relationship (m and C are parameters of the Paris law).

Fonte *et al*. (2011) discussed the influence of R by focusing on the mode of slip deformation in an aged aluminum alloy, whereas El-Shabasy and Lewandowski (2004) ascribed the strong R-effect at -125 °C to the increasing amount of cleavage fracture present on the fracture surface.

For FCG behavior at higher R, where crack closure has a lower influence, the role of K_{max} is discussed, and possible mechanical explanations including sustained-load cracking, by Lang *et al*. (1998). Morrissey *et al*. (1999) observed ductile behavior (including void nucleation and growth) and strain accumulation during high cycle fatigue of Ti–6Al–4V at a high frequency. Klesnil and Lukáš (1973a, 1973b) proposed a model to describe the R dependence of da/dN and ΔK_{th} in ferritic–pearlitic steels, as

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1\text{-}R)^{\gamma} \quad (2)$$

In this model, ΔK_{th0} , is the fatigue threshold for R = 0 and the index γ is a material-dependent parameter. Masounave and Bailon (1975) discussed the different values of γ in many materials. Sometime later, Mazumdar and Conrad (1985) incorporated the strain hardening exponent into the index. McEvily and Groeger (1977) developed modifications by fixing γ as 0.5 and replacing (1 – R) to the form of (1 - R)/(1 + R).

Moreover, Barsom (1974) reported the ΔK_{th}, could be linearly related to R in pressure vessel steels as:

$$\Delta K_{th} = A - BR \quad (3)$$

Here, A and B are material constants. Similar models were established by Ohta and Sasaki (1977) and Vosikovsky (1979) for high strength steels.

Based on the plastic strain energy density concept, Kujawski and Ellyin (1987) developed a model by considering the bulk cyclic and low cycle fatigue properties of the material to predict the effect of R on FCG at low and intermediate stress intensities. Zhao (1990) established an expression for ΔK and R by assuming that there existed an equivalent compressive high-strain area around a fatigue crack. Packiaraj *et al*. (1994) proposed modified equations by taking crack closure into account, which were found to provide an excellent correlation for the R-dependence of ΔK_{th}.

Zhang *et al*. (2003) put forward a model based on the crack tip plasticity theory for R-dependent threshold predictions without crack closure measurements. This model was found to be consistent in interpreting R dependence on ΔK_{th}, in type 316(N) stainless steel weld for R in the range of 0.05–0.4 (Samuel *et al*., 2011). Furthermore, the effect of R on fatigue behavior was investigated by the fatigue damage map method.

Thakur *et al*. (2007) extended the fatigue damage map to include crack arrest and transition from short to long crack growth, and the R-effect of FCG was predicted in a hot rolled 7020-T6 aluminum alloy. The fatigue damage map concept was also employed to describe the mechanisms for lower R dependency in the Paris regime (Jones *et al*., 2009).

In addition, some exponential models were proposed and applied to predict mean stress dependence on ΔK_{th}. Kwofie (2001) proposed an exponential mean stress function based on the equivalent stress concept. Further he developed a model that could predict ΔK_{th}, under low R values reasonably well (Kwofie, 2004). Recently, an exponential model was proposed by Baptista *et al*. (2012) to relate da/dN to ΔK in the form:

$$da/dN = e^{\alpha} e^{\beta/\Delta K} \quad (4)$$

where α and β are material constants.

6. CONCLUSIONS

Some topics regarding the parameters that influence the threshold stress intensity value, ΔK_{th}, in crack propagation under cyclic loading was reviewed and discussed. Among these parameters the effect of crack closure and R-ratio were the main focus of this review. Also the influence of the environment and the temperature was reviewed. There were also mentioned some theories that offer explanations other than crack closure for changes in ΔK_{th}. Other topics related to the threshold stress intensity regime, the respective models and their applications will be the subject of a future review.

REFERENCES

Baptista C. A. R. P., Adib A. M. L., Torres M. A. S., Pastoukhov V. A. (2012). *Describing fatigue crack growth and load ratio effects in Al 2524 T3 alloy with an enhanced exponential model*. Mech Mater.; Vol. 51, p. 66-73.

Barsom J. M. (1974). *Fatigue behavior of pressure vessel steels*. Welding Res Council Bull., Vol. 194.

Cooke R. J., Beevers C. J. (1973). *The effect of load ratio on the threshold stresses for fatigue crack growth in medium carbon steels*. Engng Fract Mech.; Vol. 5, p. 1061-71.

Chen, E.Y. (1996). PhD Dissertation, Northwestern University.

Chen D. L., Weiss B, Stickler R. (1992). *Effect of stress ratio and loading condition on the fatigue threshold*. Int J Fatigue, Vol. 14, p. 325-9.

Caton M. J., John R., Porter W. J., Burba M. E. (2012). *Stress ratio effects on small fatigue crack growth in Ti–6Al–4V*. Int J Fatigue; Vol. 38, p. 36-45.

da Fonte M, Romeiro F, de Freitas M, Stanzl-Tschegg S. E., Tschegg E. K., Vasudevan A. K. (2003). *The effect of microstructure and environment on fatigue crack growth in 7049 aluminum alloy at negative stress ratios*. Int J Fatigue, Vol. 25, p. 1209-16.

Dowson A. L., Hollis A. C., Beevers C. J. (1992). *The effect of the alpha-phase volume fraction and stress ratio on the fatigue crack growth characteristics of the near-alpha IMI 834 Ti alloy*. Int J Fatigue; Vol. 14, p. 261-70.

Dubey S, Soboyejo A. B. O., Soboyejo W. O. (1997). *An investigation of the effects of stress ratio and crack closure on the micromechanisms of fatigue crack growth in Ti-6Al-4V*. Acta Mater., Vol. 45, p. 2777-87.

Ding J., Hall R., Byrne J. (2005). *Effects of stress ratio and temperature on fatigue crack growth in a Ti–6Al–4V alloy*. Int J Fatigue, Vol. 27, p. 1551-8.

Elber W. (1971). *The significance of fatigue crack closure*. In: Damage tolerance in aircraft structures. Lutherville-Timonium, MD: ASTM STP 486; p. 230-42.

El-Shabasy A. B., Lewandowski J. J. (2004). *Effects of load ratio, R, and test temperature on fatigue crack growth of fully pearlitic eutectoid steel*. Int J Fatigue; Vol. 26, p. 305-309.

Fonte M. A., Stanzl-Tschegg S. E., Holper B., Tschegg E. K., Vasudevan A. K. (2001). *The microstructure and environment influence on fatigue crack growth in 7049 aluminum alloy at different load ratios*. Int J Fatigue; Vol. 23, p. S311-7.

Furukawa K. , Murakami Y., Nishida S. (1998). *A method for determining stress ratio of fatigue loading from the width and height of striation*. Int J Fatigue; Vol. 20, p. 509-16.

Ishihara T. (1983). *The influence of mean stress on*

fatigue crack propagation in dual phase low carbon steel. J Mater Sci, Vol. 18, p. 2629-2638.

Jha S. K., John R., Larsen J. M. (2013). *Incorporating small fatigue crack growth in probabilistic life prediction: effect of stress ratio in Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo*. Int J Fatigue; Vol. 51, p. 83-95.

Iost A. (1991). *The effect of load ratio on the m – lnC relationship*. Int J Fatigue, Vol. 13, p. 25–33.

Jones B. F. (1984). *The influence of environment and stress ratio on the low frequency fatigue crack growth behaviour of two medium-strength quenched and tempered steels*. Int J Fatigue, Vol. 6, p. 75-81.

Jones R., Farahmand B., Rodopoulos C. A. (2009). *Fatigue crack growth discrepancies with stress ratio*. Theor Appl Fract Mech.; Vol. 51, p. 1-10.

Kanazawa T., Machida S. (1975). *On the effect of cyclic stress ratio on the fatigue crack propagation*. Engng Fract Mech; Vol. 7, p. 445-55.

Kawai S. (1982). *The effect of the stress ratio on fatigue crack growth in a 3% NaCl solution*. Engng Fract Mech, Vol. 16, p. 857-70.

King J. E. (1987). *Fatigue crack propagation in nickel-base superalloys - effects of microstructure, load ratio, and temperature*. Mater Sci Technol, Vol. 3, p. 750-64.

Klesnil M., Lukáš P. (1972a). *Effect of stress cycle asymmetry on fatigue crack growth*. Mater Sci Engng; Vol. 9, p. 231-40.

Klesnil M., Lukáš P. (1972b). *Influence of strength and stress history on growth and stabilization of fatigue cracks*. Engng Fract Mech.; Vol. 4, p. 77-92.

Krenn C, Morris J. W. Jr., Mei Z. (1997). *The crystallography of fatigue crack initiation in two austenitic Fe–Ni superalloys.* In: Soboyejo WO, Srivatsan TS, editors. High-cycle fatigue of structural materials. Philadelphia (PA, USA), The Minerals, Metals and Materials Society, p. 327-37.

Kujawski D. , Ellyin F. (1987). *A fatigue crack growth model with load ratio effects*. Engng Fract Mech.; Vol. 28, p. 367-78.

Kwofie S. (2001). *An exponential stress function for predicting fatigue strength and life due to mean stresses*. Int J Fatigue; Vol. 23, p. 829-836.

Kwofie S. (2004). *Equivalent stress approach to predicting the effect of stress ratio on fatigue threshold stress intensity range*. Int J Fatigue; Vol. 26, p. 299-303.

Liaw P. (1989). *Long fatigue cracks - microstructural effects and closure*. MRS Bull., August, p. 25-35.

Liaw P. K., Leax T. R., Swaminathan V. P., Donald Jk. (1982). *Influence of load ratio on near-threshold fatigue crack propagation behavior*. Script Metall.; Vol. 16, p. 871-6.

Liaw P., Saxena A., Swaminathan V., Shih T. (1983). *Effects of load ratio and temperature on the near-threshold fatigue crack propagation behavior in a CrMoV steel*. Metall Trans A, Vol. 14, p. 1631-40.

Liaw P. K., Logsdon W. A. (1985). *The influence of load ratio and temperature on the near-threshold fatigue crack growth rate properties of pressure vessel steels*. J Engng Mater Technol., (1985); Vol. 107, p. 26-33.

Lang M., Hartman G. A., Larsen J. M. (1998). *Investigation of an abnormality in fatigue crack growth curves-the Marci Effect*. Script Mater.; Vol. 38, p. 1803-10.

Maneschy, J. E. (1998). PhD Dissertation, *Integral-J para Carregamentos Cíclicos*. IPEN/USP, (In Portuguese).

Maddox S. J. (1975). *The effect of mean stress on fatigue crack propagation a literature review*. Int J Fract., Vol. 11, p. 389-408.

Marrow T. J., Hippsley C. A., King J. E. (1991). *Effect of mean stress on hydrogen assisted fatigue crack propagation in duplex stainless steel*. Acta Metall Mater, Vol. 39, p. 1367-76.

Masounave J., Bailon J. P. (1975). *The dependence of the threshold stress intensity factor on the cyclic stress ratio in fatigue of ferritic–pearlitic steels*. Script Metall.; Vol. 9, p. 723-730.

Mazumdar P. K., Conrad H. (1985). *A strain criterion for fatigue threshold based on Neuber's approximation*. Engng Fract Mech; Vol. 21, p. 573-7.

McEvily A. J. (1996). Metals Handbook, ASM, Vol. 12, p. 318-334.

McEvily A. J., Ritchie R. O. (1998). *Crack closure and the fatigue-crack propagation threshold as a function of load ratio.* Fatigue Fract Eng Mater Struct., Vol. 21, p. 847-55.

McEvily A. J., Minakawa K. (1984). *Crack closure and the growth of short and long fatigue cracks*. Scripta Metall.; Vol. 18, p. 71-6.

McEvily A., Groeger J. (1977). *On the threshold for fatigue crack growth.* In: 4th international conference on fracture. Waterloo, Canada.

Mishra M. P., Packiaraj C. C., Ray S. K., Mannan S. L., Borgstedt H. U. (1997). *Influence of sodium environment and load ratio (R) on fatigue crack growth behaviour of a type 316 LN stainless steel at 813 K*. Int J Pres Ves Pip; Vol. 70, p. 77-82.

Morrissey R. J., McDowell D. L., Nicholas T. (1999). *Frequency and stress ratio effects in high cycle fatigue of Ti–6Al–4V*. Int J Fatigue; Vol. 21, p. 679-85.

Morris W. L., Buck O. (1977). *Crack closure load measurements for microcracks developed during the fatigue of Al 2219-T851*. Metall Trans A; Vol. 8, p. 597-601.

Nunomura S., Fukui Y. (1978). *Effect of stress ratio on fatigue crack propagation*. J Soc Mater Sci, Jpn; Vol. 27, p. 1103-9.

Oberwinkler B. (2011). *Modeling the fatigue crack growth behavior of Ti-6Al-4V by considering grain size and stress ratio*. Mater Sci Engng, A, Vol. 528, p. 5983-92.

Ohta A, Sasaki E. (1977). *Influence of stress ratio on the threshold level for fatigue crack propagation in high strength steels*. Engng Fract Mech.; Vol. 9, p. 307-15.

Packiaraj C. C., Ray S. K., Mannan S. L. (1994). *The influence of crack closure on the positive load ratio (R) dependence of fatigue threshold stress intensity factor range of AISI 316 stainless steel in air at room temperature*. Int J Pres Ves Pip.; Vol. 57, p. 65-70.

Paris P. C., Gomez M. P., Anderson W. E. (1961). *A rational analytic theory of fatigue*. Trends Eng., Vol. 13, No. 1, p. 9-14.

Paris P. C., Erdogan F. (1963). *A critical analysis of crack propagation laws*. J Basic Eng., Vol. 85, p. 528-34.

Ritchie R. O., Yu W., Holm D. K., Blom A. F. (1988). *Development of fatigue crack closure with the extension of long and short cracks in aluminum alloy 2124, a comparison of experimental and numerical results*. In: Newman J. C., Elber W., ed. Mechanics of fatigue crack closure. ASTM STP 982; p. 300-16.

Ritchie R. O. (1977). *Near-threshold fatigue crack propagation in ultra-high strength steel: influence of load ratio and cyclic strength*. J Engng Mater Technol; Vol. 99, p. 195-204.

Ritchie R. O., Knott J. F. (1973). *Mechanisms of fatigue crack growth in low alloy steel*. Acta Metall; Vol. 21, p. 639-48.

Robinson J. L., Beevers C. J. (1973). *The effects of load ratio, interstitial content, and grain size on low-stress fatigue-crack propagation in a-Titanium*. Met Sci; Vol. 7, p. 153-159.

Ruckert C. O. F. T., Messias Filho A. A., Bose Filho W. W., Spinelli D., Tarpani J. R. (2011). *Load ratio estimation through striation height and spacing analysis of an aerospace Al alloy 7475-T7351*. J Mater Engng Perform, Vol. 20, p. 382-9.

Salivar G. C., Heine J. E., Haake F. K. (1989). *The effect of stress ratio on the near-threshold fatigue crack growth behavior of Ti-8Al-1Mo-1V at elevated Temperature*, Engng Fract Mech., Vol. 32, p. 807-817

Samuel K. G., Sasikala G., Ray S. K. (2011). *On R ratio dependence of threshold stress intensity factor range for fatigue crack growth in type 316(N) stainless steel*. Materials Science and Technology, Vol. 27, No 1, p. 371-376.

Sanders B. P., Mall S., Jackson S. C. (1999). *Load ratio effects on fatigue response of titanium matrix composite at elevated temperature*. Int J Fatigue, Vol. 21, p. 121-34.

Saxena V. K., Radhakrishnan V. M. (1999). *Effect of wrought product thickness and stress ratio on fatigue crack growth behavior of a quaternary aluminum– lithium alloy*. J Engng Mater Technol., Vol. 121, p. 393-8.

Schmidt R. A., Paris P. C. (1973). *Threshold for fatigue crack propagation and the effects of load ratio and frequency*. In: Progress in flaw

growth and fracture toughness testing. West Conshohoken, PA: ASTM STP 536; p. 79-94.

Shademan S, Sinha V, Soboyejo A. B. O., Soboyejo W. O. (2004). *An investigation of the effects of microstructure and stress ratio on fatigue crack growth in Ti-6Al-4V with colony alpha/beta microstructures*. Mech Mater, Vol. 36, p. 161-75.

Shanyavsky A. A., Orlov E. F., Koronov M. Z. (1995). *Fractographic analyses of fatigue crack growth in D16T alloy subjected to biaxial cyclic loads at various R ratios*. Fatigue Fract Engng Mater Struct, Vol. 18, p. 1263-76.

Shimojo M., Chujo M., Higo Y., Nunomura S. (1993). *Effect of load ratio on the deformation behaviour of fatigue crack tips*. Int J Fatigue; Vol. 15, p. 455-9.

Stewart A. T. (1980). *The influence of environment and stress ratio on fatigue crack growth at near threshold stress intensities in low alloy steels*. Eng Fract Mech, Vol. 13, p. 463-78.

Suresh S, Ritchie R. O. (1983). *On the influence of environment on the load ratio dependence of fatigue thresholds in pressure vessel steel*. Engng Fract Mech, Vol. 18, p. 785–800.

Suresh S., Ritchie R. (1984). *Propagation of short fatigue cracks*. Int Metals Ver, Vol. 29, p. 445-74.

Suresh S. (1991). *Fatigue of materials*. Cambridge: Cambridge University Press, First Edition.

Thakur A., Raman R., Malhotra S. N. (2007). *Stress ratio and fatigue damage map study of hot rolled 7020-T6 aluminum alloy*. Mater Sci Engng, A.; Vol. 454, p. 552-7.

Tokaji K., Ogawa T., Kameyama Y. (1990). *The effects of stress ratio on the growth behavior of small fatigue cracks in an aluminum alloy 7075-T6 (with special interest in stage I crack growth)*. Fatigue Fract Engng Mater Struct; Vol. 13, p. 411-21.

True-Hwa S, Wei R. P. (1983). *The effects of load ratio on environmentally assisted fatigue crack growth*. Engng Fract Mech., Vol. 18, p. 827-37.

Uchida Y., Shimojo M., Higo Y. (1999). *Relationship between fatigue striation height and stress ratio*. J Mater Sci; Vol. 34, p. 2411-9.

Vosikovsky O. (1979). *The effect of stress ratio on fatigue crack growth rates in steels*. Engng Fract Mech.; Vol. 11, p. 595-602.

Walker K. (1970). *The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum*. In: Effects of environment and complex load history on fatigue life: a symposium. Lutherville-Timonium, MD: ASTM STP 462; p. 1-14.

Wöhler, A. (1860). *Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagenachsen einwirkenden Kräfte und die Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen*. Zeitschrift für Bauwesen, X, p. 583-616.

Yoder G. R., Cooley L. A., Crooker T. W. (1983). The effect of load ratio on fatigue crack growth in Ti-8Al-1Mo-1V. Engng Fract Mech, Vol. 17, p. 185-8.

Zhu S. J., Peng L. M., Moriya T, Mutoh Y. (2000). *Effect of stress ratio on fatigue crack growth in TiAl intermetallics at room and elevated temperatures*. Mater Sci Engng, A. Vol. 290, p. 198-206.

Zhang X. P., Wang C. H., Ye L., Mai Y. W. (2005). *A study of the crack wake closure/opening behaviour of short fatigue cracks and its influence on crack growth*. Mater Sci Engng, A; Vol. 406, p. 195-204.

Zhang J., He X. D., Du S. Y. (2003). *A simple engineering approach in the prediction of the effect of stress ratio on fatigue threshold*. Int J Fatigue; Vol. 25, p. 935-8.

Zheng J, Powell B. E. (1999). *Effect of stress ratio and test m.ethods on fatigue crack growth rate for nickel based superalloy Udimet720*. Int J Fatigue, Vol. 21, p. 507-13.

Zhao X. (1990). *The effects of stress ratio on fatigue threshold*. Int J Fatigue; Vol. 12, p. 127-30.

Zhihong Z, Yuefeng G, Osada T, Yong Y, Chuanyong C, Yokokawa T. (2011). *Fatigue crack growth characteristics of a new Ni-Co-base superalloy TMW-4M3: effects of temperature and load ratio*. J Mater Sci. Vol. 46, p. 7573-81.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO BIOMECÁNICO DE LA EPÍFISIS FEMORAL EN NIÑOS DE 6 AÑOS AFECTADA POR NECROSIS AVASCULAR: MODELO COMPUTACIONAL

ANALYSIS OF THE BIOMECHANICAL BEHAVIOR OF THE FEMORAL EPÍPHYSIS IN CHILDREN OF 6 YEARS AFFECTED BY AVASCULAR NECROSIS: COMPUTATIONAL MODEL

Andrés Fabián Mejía Rojas[*], Oscar Rodrigo López Vaca[**]

[*] **Universidad Santo Tomás,** Facultad de Ingeniería Mecánica, GEAMEC
Calle 18 # 6-33, Soacha, Cundinamarca, Colombia.
8210312, 01157031-8210312 y 031-8210312.
E-mail: andresmejiar@usantotomas.edu.co.
[**] **Universidad Santo Tomás,** Facultad de Ingeniería Mecánica, GEAMEC
Carrera 9 # 51-11, Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
3115345570.
E-mail: oscarlopez@usantotomas.edu.co.

Resumen: La Osteonecrosis (ON) o Necrosis Avascular es una patología caracterizada por ser una enfermedad de debilitamiento de la epífisis de los huesos largos, siendo provocada por la irrupción de flujo sanguíneo. En este trabajo se realiza un análisis biomecánico que permite entender los cambios en las líneas de transferencia de los esfuerzos presentes en la epífisis femoral en presencia de ON en niños de 6 años de edad, y que conducen a la fractura del hueso subcondral, a partir del tipo de lesión necrótica. El análisis de la variación en el comportamiento mecánico se realiza mediante el de método de los elementos finitos, y los dominios de trabajo se construyeron a partir del uso de tomografías computacionales (CT).

Palabras clave: Osteonecrosis Avascular, elementos finitos, análisis biomecánico, tomografías computacionales.

Abstract: Osteonecrosis (ON) or Avascular Necrosis is a pathology characterized by a weakening of the epiphysis of the long bones, caused by the irruption of blood flow. In this work, a biomechanical analysis is carried out to understand the changes in the lines of transfer of the forces present in the femoral epiphysis in the presence of ON in children of 6 years of age, and that lead to fracture of the subchondral bone, from of the type of necrotic lesion. The analysis of the variation in mechanical behavior is done by the finite element method, and the work domains were constructed from the use of computational tomography (CT).

Keywords: Avascular osteonecrosis, finite elements, biomechanical analysis, computed tomography.

1. INTRODUCCIÓN

Las alteraciones del flujo sanguíneo en el fémur proximal son causa frecuente de severas deformidades y discapacidades subsecuentes [1]. Algunos estudios han demostrado la compleja anatomía vascular de la cadera en desarrollo [2].

En el niño, la cabeza femoral (CF) recibe irrigación sanguínea de vasos epifisarios y vasos que cruzan la región fisaria (Figura 1). Estos vasos desaparecen a medida que la osificación progresa en la CF [3]. El patrón de distribución sanguíneo es variable, y cualquier deficiencia puede contribuir al desarrollo de necrosis avascular también conocida como Osteonecrosis (ON).

La ON es una enfermedad producida por la falta temporal o permanente de irrigación sanguínea al hueso, que da lugar progresivamente a la muerte del tejido óseo y posteriormente a la destrucción del hueso [4]. En correspondencia con trastornos de crecimiento endocondral y osteocondrosis, la ON se presenta como la primera etapa de estas; el ejemplo más evidente es la enfermedad de Legg-Calvé-Perthes (LCP), la cual es una patología pediátrica caracterizada por la necrosis avascular en la CF.

LCP inicia con un período de isquemia que causará necrosis de la CF inmadura, ésta lleva a su fragmentación y a fracturas subcondrales por estrés; con lo que inicia su período clínico y posteriormente pasar a un período de absorción ósea, reosificación y remodelación de la CF, dejando como secuelas alteraciones de la longitud de la extremidad, subluxación o deformidades tanto de la CF como del acetábulo [5].

Como resultado de estos eventos isquémicos el crecimiento del centro secundario de osificación, se altera y el hueso se vuelve denso (necrótico). Este hueso denso es luego reabsorbido y reemplazado por hueso nuevo[6]. Mientras que sucede este proceso las propiedades mecánicas del hueso se alteran y la cabeza femoral tiende a aplanarse y agrandarse [7].

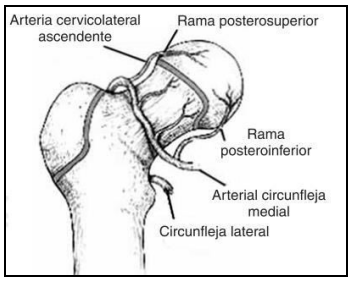


Figura 1. *Vascularidad del fémur proximal en desarrollo.*

La cabeza femoral se osifica entre el segundo y el octavo meses después del nacimiento y se fusiona con el cuello entre los 15 y 21 años en los niños y un año más temprano en las niñas (Figura 2).

Durante la niñez persiste un puente cartilaginoso entre la epífisis femoral proximal y la apófisis trocantérica a lo largo de la parte superior del cuello femoral. Por esta razón, las fracturas de cadera que cruzan esta área vulnerable pueden producir alteraciones en el crecimiento de la metáfisis, cuello y cabeza femorales.

Existen numerosos métodos de clasificación y valoración respecto al diagnóstico de la ON, sin embargo, resulta complejo realizar un paralelo entre ellas. A través del tiempo, se han desarrollado sistemas de clasificación como auxilio médico que permiten caracterizar la enfermedad.

Entre las distribuciones más aludidas en el campo médico se encuentran, la clasificación de Catterall , la elaborada por Salter y Thompson, y finalmente aquella hecha por Herring [8].

Hoy en día se cuentan con numerosos tratamientos farmacológicos, terapéuticos y quirúrgicos para el cuidado y recuperación de la ON, donde la alternativa a utilizar depende primordialmente del estadio de clasificación en el que se encuentra el paciente.

Dentro de los tratamientos farmacológicos se encuentra el uso de medicamentos antihipertensivos, antiinflamatorios, y agentes lípidos y anticoagulantes. Estos son usados para aliviar el dolor e inflamación, disminuir los niveles de grasa en la sangre e impedir que los coágulos obstruyan el flujo sanguíneo a los huesos [4].

Por otro lado existen tratamientos terapéuticos y de estimulación articular que ejercitan la junta afectada con la finalidad de incrementar la motricidad la misma, sin embargo, estos tratamientos desconocen la fisiopatología de la enfermedad, ya que son utilizados los estadios más prematuros de la enfermedad [9] .

Tras grandes periodos de evolución de la patología, la mayoría de pacientes que padecen ON necesitarán intervención quirúrgica. Bajo esta particularidad, la medicina cuenta con procesos tales como la cirugía de descompresión del núcleo, la osteomía, el injerto de hueso y el reemplazo total de la articulación [10].

La ley de Wolff, pilar fundamental en el cual se configura este trabajo, establece que la estructura y función del hueso son totalmente independientes, por ello, la ruptura del tejido trabecular en la zona necrótica devasta las líneas de trasferencia de esfuerzo generando cambios en el comportamiento biomecánico y consecuentemente fallas en el apoyo mecánico en junta de la cadera [9], por lo tanto, el objetivo de este trabajo se centra en determinar el cambio en las líneas de trasferencia de esfuerzo por la presencia de ON en la epífisis femoral en niños de 6 años.

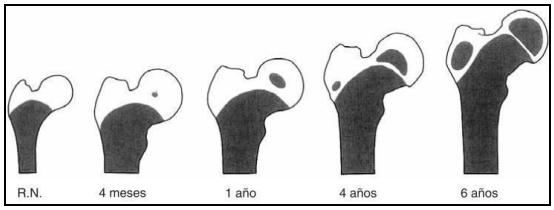


Figura 2. *Desarrollo óseo del fémur proximal desde el nacimiento a los 6 años.*

2. JUSTIFICACIÒN

Los recientes avances en la tecnología, aumentan diariamente el nivel de calidad de vida de las personas; y motivan la aplicación de una medicina más eficiente y menos invasiva [11].

Estos avances se deben a la acción interdisciplinaria de investigadores que conjugan conocimientos médicos e ingenieriles. En particular, los desarrollos en la rama de la biomecánica resultan un aporte importante a la ortopedia y traumatología [12].

Con el rápido desarrollo de la tecnología computacional, se ha implementado vertiginosamente el uso de imágenes médicas en el campo de la salud [13]. Con dichas imágenes es posible observar diversas partes del cuerpo humano con el fin de ayudar a los médicos y especialistas a diagnosticar alguna afección que posea el paciente [14]. Además, permiten cuantificar en uno u otro grado enfermedades específicas, como la osteonecrosis avascular, sin la necesidad de someter al paciente a métodos como la cirugía [15].

Por consiguiente, el análisis de elementos finitos se define para este caso como una herramienta muy poderosa para obtener evaluaciones más sofisticadas de la resistencia ósea y el riesgo de fractura relacionado[15].

El creciente número de personas en condiciones pediátricas, que son las más propensas a sufrir de LCP, el elevado costo de la experimentación in-vitro, el desconocimiento del comportamiento anatómico del fémur bajo diferentes estadios de la enfermedad, entre otros factores, han motivado un mayor protagonismo de la biomecánica computacional, marco en el cual se desarrolla este trabajo.

A nivel nacional se han encontrado pocos trabajos de investigación sobre la ON [14]. Si se hace énfasis en lo anterior es evidente la necesidad de realizar más estudios con el objetivo de caracterizar, fortalecer y sobre todo comprender el curso natural de la enfermedad y, así sea posible aportar elementos de juicio que permitan validar los métodos actuales para el tratamiento de la afección.

Por ello, determinar el comportamiento biomecánico de la epífisis bajo un escenario necrótico permitirá obtener información de la variación del estímulo mecánico sobre el tejido cartilaginoso y óseo, insumo fundamental para la realización de modelos mecanobiológicos o fenomenológicos que permitan estudiar los procesos de modelado, remodelado y daño en el crecimiento endocondral.

3. MÉTODOS

Se reconstruye la cadera de una niña de 6 años de edad a partir de tomografías computacionales. Las lesiones producidas por la ON de acuerdo al estadio y porcentaje de afectación en el volumen de la epífisis femoral fueron elaboradas haciendo énfasis en la clasificación establecida por Herring.

Se elaboró un modelo bajo condiciones sanas y un modelo patológico. El modelo sano se utilizó con el fin de determinar y validar el comportamiento biomecánico de la epífisis femoral sin ninguna contribución patológica (Figura 3). Para ambos modelos se diseñan los cartílagos de crecimiento y, se reconocen las diferentes densidades óseas que constituyen el hueso (hueso trabecular y cortical). Asimismo, se elabora el respectivo diseño y reconstrucción ósea que corresponde a los tejidos necrosados como se muestra en la como se muestra en la figura 4.

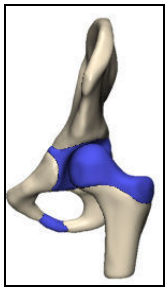


Figura 3. *Reconstrucción ósea de cadera sana niña de 6 años.*

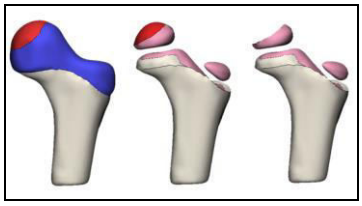


Figura 4. *Reconstrucción ósea del fémur con necrosis avascular tipo C.*

Las propiedades mecánicas para los tejidos óseos y los cartílagos se obtuvieron de los estudios técnicos reportados y validados en la literatura especializada [16][17][15] (Tabla 1). La asignación de propiedades mecánicas para cada uno de los tejidos fue realizada asumiéndolos como un material bilineal, es decir apreciando su propiedad de plasticidad y una estructura anisotropíca del fémur para así determinar el cambio en las líneas de trasferencia de esfuerzo.

Se establecen las condiciones de frontera de acuerdo a las condiciones de carga producidas en la cadera para una posición bipodal erguida y producidas por los músculos de los glúteos, ligamento iliofemoral y peso del paciente. Las cargas se definieron de acuerdo al modelo presentado por Pauwells y Brinckmann (Tönnis).

De acuerdo a esto, como primer condición de carga se aplica una presión sobre el cartílago de la epífisis femoral en un área equivalente a la zona donde se encuentra el ligamento iliofemoral, por otra parte, en la superficie de la cresta iliaca y bajo un área semejante a la línea de acción muscular del glúteo mayor, se ubica la segunda condición.

Las opciones de contacto fueron definidas entre las superficies de los diferentes tejidos interconectados (hueso cortical – hueso trabecular, hueso cortical – cartílago y hueso trabecular - lesión), se tomaron contactos tipo Bonded debido a que este permite la unión de las superficies en todas las direcciones evitando deslizamientos y la separación entre ellas, de igual forma como ocurre en la realidad entre las superficies interconectadas de los tejidos.

Tabla 1. *Propiedades mecánicas de los elementos mecánicos*

Componente	***Modulo Elástico (Mpa)***	***Coeficiente de Poisson***	***Autor***
Hueso Cortical	17000	0,3	(Sunghyen & Mistugu, 2013)
Hueso Trabecular	1500	0,33	(Voo, Armand, & kleinberger, 2004)
Cartílago acetabular	1,236	0,043	(Gozzoli Pietro, 2017)
Cartílago epifisiario	1,186	0,039	(Gozzoli Pietro, 2017)
Cartílago necrosado	0,8	0,35	Valores establecidos por el autor con carácter experimental
Osificación lesionada	100	0,4	Valores establecidos por el autor con carácter experimental

La malla de elementos finitos para ambos modelos se generó mediante el uso de métodos adaptativos para geometrías orgánicas como se ve en la (Figura 5). Se emplearon elementos tetraédricos 3D y se realizó un análisis de convergencia para validar la aproximación del método numérico, de tal forma que se obtuvo un enmallado de 162.280 elementos con 261.146 nodos

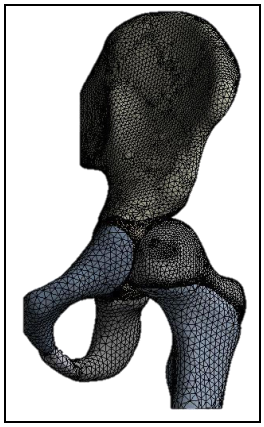


Figura 5. *Malla de elementos finitos generada para las geometrías orgánicas.*

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de validar los modelos computacionales, inicialmente se realizó una la simulación de los elementos de trabajo suponiendo condiciones óptimas para cada uno de los tejidos, es decir, dentro de una atmosfera normal y sin ninguna patología; posteriormente, se evaluaron los resultados para el modelo en escenario necrótico. Ambos modelos fueron comparados de acuerdo a los desplazamientos que la cadera sufre, la distribución de esfuerzos presentes en la epífisis femoral, la distribución de esfuerzos en el cartílago acetabular y finalmente los esfuerzos presentes en el centro secundario de osificación.

A pesar de que la necrosis avascular es una enfermedad con una complejidad alta en su curso natural, a la fecha no están completamente comprendidos los mecanismos que conllevan a su inicio. Aunque se han desarrollado varios estudios alrededor de esta patología, estos se han enfocado a la determinación de los factores que conducen a los inicios de la enfermedad basados en análisis radiológicos (análisis descriptivos) y biológicos [18]. De esta forma Harry K.W. et al. [19] determinaron a través de estudios experimentales indicios que los factores mecánicos y biológicos contribuyen al desarrollo de la cabeza femoral. De acuerdo a esto, son escasos los estudios que permitan establecer la importancia del estímulo mecánico en el deterioro, modelado o remodelado de la epífisis bajo un escenario necrótico. La experimentación computacional ha surgido como una herramienta que permite mejorar el entendimiento sobre el desarrollo biológico de patologías complejas, de esta forma los modelos biomecánicos que se desarrollan en relación a dichas afecciones médicas, surgen como una alternativa para el entendimiento de la biología básica del proceso del modelado y regeneramiento óseo, disminuyendo tiempos y evitando experimentación en seres vivos.

Aunque no existen reportes documentados de como varían las propiedades mecánicas de los tejidos afectados por la necrosis, en este trabajo se asumió una disminución en la rigidez de los tejidos involucrados (cartílago epifisial y centro primario de osificación), por lo que en el centro secundario de osificación el módulo de rigidez se disminuyó de 400 a 100 MPa lo que indica una reducción del 75% y en el cartílago epifisial se disminuyó de 1,186 a 0,8 MPa representando una reducción del 32%. Como resultado de esta variación en las propiedades mecánicas se puede observar que en el modelo afectado por necrosis los valores de esfuerzo aumentaron en un 65% dentro de la epífisis femoral. Por otro lado, en el modelo sano se puede apreciar que las condiciones de carga, y la transferencia de esfuerzos en la articulación favorece el estímulo mecánico en la placa de crecimiento (Figura 6a) y así mismo se evidencia una reciprocidad en el estímulo mecánico que se produce en el hueso trabecular presente en el centro secundario de osificación y en hueso trabecular del íleon, condiciones que favorecen los procesos biológicos para el remodelado y modelado del tejido óseo. Comparando estás condiciones en el modelo afectado por necrosis se evidencia que por la presencia de esta patología el estímulo mecánico en la placa de crecimiento (fundamental para el proceso de osificación endocondral) se disminuye en un 42% y adicionalmente el centro secundario de osificación aumenta sus esfuerzos en su zona media (zona

colindante entre el hueso trabecular sano y el necrosado) en un 37%, lo que indica la posible presencia de fracturas trabeculares producto de los sobreesfuerzos presentes.

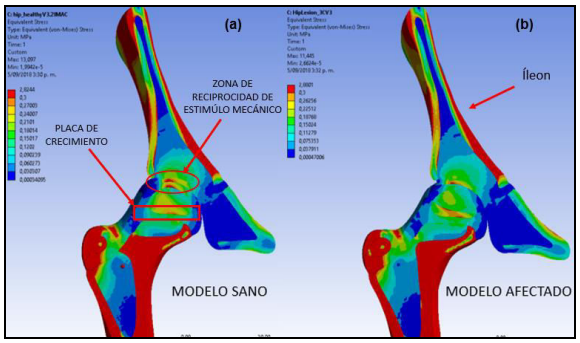


Figura 6. *Comparación de resultados entre los modelos computacionales.*

Las diferencias entre el modelo sano y el modelo afectado con necrosis avascular, inicialmente radican en la distribución y magnitud de los esfuerzos dentro de la cabeza femoral. Esto evidentemente es producto de la disminución de la rigidez en los tejidos necrosados, lo que conlleva a un cambio en la distribución de las líneas de isoesfuerzo según lo planteado en la ley de Wolff, por lo que el esfuerzo en el modelo patológico se concentra en la zona media del centro secundario de osificación (Figura 6b) lo que puede propiciar el inicio de fracturas o retrasos en la osificación endocondral por las nuevas condiciones de esfuerzos.

Debido a la transferencia de esfuerzos presentes en la articulación coxofemoral sana, se genera un estímulo mecánico en la zona de la placa de crecimiento que posteriormente da lugar a la osificación del cartílago epifisiario (Figura 6a). Por otro lado, los esfuerzos que se hallan en la zona de reciprocidad del cartílago acetabular y el cartílago epifisial, se traducen como un estímulo mecánico para el remodelado óseo entre el hueso trabecular del ilion y el hueso trabecular del fémur.

Dadas las condiciones patológicas para el modelo afectado y lo que se aprecia en la figura 6b, la transferencia de cargas por parte del cartílago acetabular hacia la epífisis femoral es interrumpida debido a la falta de reciprocidad mecánica entre los cuerpos de contacto, causando una posible distorsión de la cabeza femoral. El centro secundario de osificación al estar bajo escenario necrótico muestra una sobrecarga de esfuerzos en su zona media, inhibiendo la transmisión de esfuerzos hacia la placa de crecimiento, lo que posiblemente implica un retraso al proceso de osificación endocondral, y posteriormente dar lugar a la fractura subcondral.

A pesar de todas estas diferencias la distribución de esfuerzos comparado con lo encontrado en la literatura especializada es similar y, el rango de los esfuerzos están dentro de la misma magnitud. Esto permite concluir que el trabajo realizado a pesar de sus simplificaciones permite establecer un comportamiento biomecánico que no se aleja de la realidad biológica y permite el entendimiento de patologías relacionados con el malfuncionamiento de diferentes tejidos presentes en la articulación coxofemoral.

REFERENCIAS

[1] Saludalia, “Fracturas de cadera en el niño,” pp. 1–7, 2016.

[2] M. Zlotorowicz and J. Czubak, “Vascular Anatomy and Blood Supply to the Femoral Head,” pp. 19–26, 2014.

[3] H. Muñoz Carrillo, “Fracturas de cadera en el niño,” pp. 1–7, 2000.

[4] M. Valle, M. Noa, and R. Mas, “Osteonecrosis. Una breve revisión,” vol. 41, no. 2, pp. 91–97, 2010.

[5] A. De Revisión and R. F. Austria, “Enfermedad de Legg-Calvé-Perthes,” *Acta Ortopédica Mex.*, vol. 23, no. 3, pp. 172–181, 2009.

[6] Y. D. Hailer, A. C. Haag, and O. Nilsson, “Legg-Calvé-perthes disease: quality of life, physical activity, and behavior pattern.,” *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 34, no. 5, pp. 514–21, 2016.

[7] A. G. Martínez Lozano, “Enfermedad de Legg-Calvé-Perthes. Conceptos actuales,” *Rev. Mex. Ortop. Pediátrica*, vol. 5, no. 1, pp. 5–11, 2003.

[8] G. L. Y. Alvarez López A, “Clasificación y diagnóstico de la osteonecrosis de cabeza femoral,” *Medicina (B. Aires).*, pp. 58–65, 2005.

[9] R. López, J. Ruiz, L. Pineda, and U. S.

Tomás, "Comportamiento biomecánico de la epífisis femoral en presencia de osteonecrosis," 2014.

[10] M. A. Martínez-Ferrer, P. Peris, and N. Guañabens, "Osteonecrosis. ¿Qué hay de nuevo?," *Reumatol. Clin.*, vol. 3, no. 2, pp. 78–84, 2007.

[11] J. M. R. Lelis, M. A. Ocampo, A. A. Pliego, J. N. Torres, and G. P. Piña, "Estudio de transmisión de carga en el fémur humano," pp. 164–168, 2007.

[12] N. E. Z. Mart *et al.*, "Necrosis de la cabeza femoral tras fractura del cuello femoral tratada mediante osteosíntesis," vol. 35, pp. 11–13, 2000.

[13] D. Y. G. L. Dr. Alejandro Alvarez López, "Clasificación y diagnóstico de la osteonecrosis de cabeza femoral," *Perspect. Sci.*, vol. 1, no. 1, 2012.

[14] M. Mogollon, "Incidencia de necrosis avascular de cabeza de femur en pacientes adultos," Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado," 2000.

[15] E. Schileo, F. Taddei, A. Malandrino, L. Cristofolini, and M. Viceconti, "Subject-specific finite element models can accurately predict strain levels in long bones," *J. Biomech.*, vol. 40, no. 13, pp. 2982–2989, 2007.

[16] R. O. A. M. A. . C. C. J. GARZÓN D.A., *Analisis por elementos finitos del proceso de regeneración ósea*. 2004.

[17] D. Kluess, J. Wieding, R. Souffrant, W. Mittelmeier, and R. Bader, "Finite Element Analysis in Orthopaedic Biomechanics," *Finite Elem. Anal.*, pp. 151–171, 2010.

[18] C. Anal and E. M. Araujo, "Sindrome de legg calve perthes," *Rev. Posgrado la VIa Cátedra Med.*, vol. 1, pp. 10–14, 2007.

[19] H. K. W. Kim, "Legg-Calve-Perthes Disease : Etiology , Pathogenesis , and Biology," vol. 31, no. 2, pp. 141–146, 2011.

[20] M. Pinheiro, C. A. Dobson, D. Perry, and M. J. Fagan, "New insights into the biomechanics of Legg-Calvé-Perthes' disease," *Bone Jt. Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 148–156, 2018.

[21] M. da S. Pinheiro, C. Dobson, N. M. Clarke, and M. Fagan, "The potential role of variations in juvenile hip geometry on the development of Legg-Calvé-Perthes disease: a biomechanical investigation," *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 21, no. 2, pp. 194–200, 2018.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ANÁLISIS DE RIESGO DE ACCIDENTALIDAD DE VEHICULOS PESADOS EN LA VÍA CÚCUTA – PAMPLONA

RISK ANALYSIS OF HEAVY VEHICLE ACCIDENTS ON THE CÚCUTA - PAMPLONA ROAD

MSc(c) Adrián Ricardo Patiño Morantes[*], PhD. Gonzalo Guillermo Moreno Contreras[*], PhD. Bladimir Azdrúbal Ramón Valencia[*]

[*]**Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica Universidad de Pamplona (GIMUP), Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
E-mail: adrian_ricardo_19@hotmail.com, gmoren@gmail.com, hbladimir@unipamplona.edu.co

Resumen: El presente artículo muestra en detalle la metodología empleada para determinar los puntos críticos de accidentalidad de vehículos pesados en la vía Cúcuta – Pamplona. Esta vía es muy importante, ya que conecta el nororiente colombiano con el resto del país, por donde se mueven pasajeros y gran parte del comercio internacional con Venezuela. A través de una encuesta dirigida a los usuarios de la vía, se pudo determinar los puntos críticos de accidentalidad, los tipos de accidentes más frecuentes y la clase de vehículos pesados con mayor incidencia de accidentalidad.

Palabras clave: *Accidentalidad, vehículos pesados, puntos críticos, vía.*

Abstract: This article shows in detail the methodology used to determine the critical points of heavy vehicle accidents on the Cúcuta - Pamplona road. This route is very important, since it connects the northeast of Colombia with the rest of the country, where passengers and much of the international trade with Venezuela go through. Through a survey addressed to road users, it was possible to determine the critical accident points, the most frequent types of accidents and the class of heavy vehicles with the highest incidence of accidents..

Keywords: *Accident, heavy vehicles, critical points, road*

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad para los países es de vital importancia el transporte de mercancías, lo cual incluye tanto su producción como los productos que importa, este transporte en su mayoría se realiza a través de vehículos pesados, todo esto permite impulsar gran parte del crecimiento económico y social de un país. Según García *et al*., (2012), a través de los años, estos vehículos han tenido mejoras significativas con respecto a su velocidad, capacidad de carga, comodidad entre otros aspectos. Todo esto ha permitido el aumento de vehículos en las vías y por consiguiente también el aumento del número de accidentes y la disminución de la seguridad vial.

De acuerdo con Moreno *et al.,* (2018), los accidentes más frecuentes de los vehículos pesados cuando realizan curvas son el volcamiento y la salida de la pista (deslizamiento), los cuales son problemas relacionados con la estabilidad de estos

vehículos, en este sentido, el Static Rollover Threshold (*SRT*) por sus siglas en inglés, es un factor que permite determinar qué tan seguro es un vehículo en términos de estabilidad y a qué velocidad puede transitar por determinada curva (Moreno *et al.,* 2018a).

Teniendo en cuenta este aspecto, la seguridad vial está ligada directamente con tres factores: el conductor, el vehículo y la carretera, relacionados entre sí y en la forma en que ellos actúan y como se desenvuelvan, se observa el aumento o la disminución de la seguridad vial.

Por consiguiente, la seguridad vial en esta vía es de vital importante, ya que es la principal ruta de comunicación del Departamento Norte de Santander con el resto del país y siendo adicionalmente la vía por donde se mueve gran parte del comercio internacional con Venezuela.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, el presente trabajo se desarrolló, con la finalidad de dar a conocer a los usuarios de la vía, en que trayectos o tramos de esta vía deben transitar con mayor precaución para evitar accidentes, y además, porque a través de los años ha habido ciertos puntos críticos de accidentalidad que no han podido ser disminuidos o eliminados en su totalidad, debido a muchos factores como la falta de señalización, alta velocidad de los vehículos, el mal estado de la vía entre otros.

2. ANTECEDENTES

Usualmente los vehículos pesados no representan gran número de accidentes por volcadura o salida de la vía, pero debido a la gravedad de estos accidentes cuando se presentan, es un tema importante para ser analizado (Güemez, 2013; Jabour, 2010).

De acuerdo con Grislis (2010), la accidentalidad por problemas relacionados con la estabilidad de estos vehículos se ha incrementado debido a: mal estado de la infraestructura vial, falta o mala señalización, altas velocidades al tomar una curva, imprudencias de los conductores al realizar diferentes maniobras y al aumento de vehículos en las vías.

De acuerdo con el informe de la Comunidad Andina de Naciones (CAN, 2016) en Colombia en el año 2015, se presentaron 8484 accidentes por volcamiento de vehículos, siendo el 77% de estos accidentes en la zona rural, representada por las vías primarias nacionales.

En la actualidad, la accidentalidad por volcamiento de vehículos pesados está relacionada con la estabilidad y esta a su vez con la altura de su centro de gravedad (Chu *et al.,* 2018), que en comparación con otros vehículos es elevada. Para disminuir esta accidentalidad y mejorar la seguridad vial, se han diseñado una serie de mecanismos que incluyen:

1. Señales de tránsito que indican a qué velocidad deben tomar la curva estos vehículos. Estas señales presentan una desventaja, ya que no se diseñan teniendo en cuenta parámetros del vehículo, geometrías de la vía o condiciones climáticas.

2. Sistemas de estabilidad del vehículo, que le permiten al conductor disminuir la velocidad del vehículo y evitar el volcamiento.

3. ANÁLISIS DE RIESGO

La accidentalidad de vehículos pesados en relación con volcamiento y salida de la vía en la vía Cúcuta – Pamplona (Ruta 55), entre los años 2010 y lo que va corrido del 2018 es de 25 accidentes, según datos aportados por la Policía de Tránsito y Transporte, seccional Norte de Santander, Colombia (Policía Nacional 2018). De acuerdo con los relatos aportados, en estos accidentes se observan consecuencias como muertos, heridos, daño de los vehiculó, perdidas de mercancía y cierres de la vía, pero no hay cifras concretas o exactas de cada uno de estos efectos.

Adicionalmente, se puede manifestar que en estos accidentes, las causas probables fueron: exceso de velocidad del vehículo, falta de pericia del conductor, fallas mecánicas, adelantar en curva, o cansancio del conductor.

Según los datos aportados, los puntos críticos de accidentalidad de vehículos pesados en la vía Cúcuta – Pamplona son:

- Kilómetro 71+280 denominado la curva de los Adioses,
- Kilómetro 84+300 denominado las S antes de las Cocalinas,
- Kilómetro 85+450 denominado las Cocalinas,
- Kilómetro 98+060 denominado el Diamante,
- Kilómetro 109+600 denominado la Donjuana.

Siendo los puntos tomados con referencia de la vía Presidente – Pamplona – Cúcuta, donde Presidente (vía Málaga, Santander) es el kilómetro 00+000, la entrada a Pamplona es el kilómetro 70+200 y Cúcuta es el kilómetro 131+500 Policía Nacional (2018).

Sin embargo, y debido a que muchas veces los accidentes no son reportados o no se tiene registro de ellos, no se cuenta con una estadistica detallada que permita identificar los puntos de mayor riesgo para los vehiculos pesados.

Con el fin de obtener información más detallada sobre la accidentalidad de la vía, se realizó una encuesta de accidentalidad de vehículos pesados en la vía Cúcuta-Pamplona, aplicada a usuarios frecuentes de la vía (Tabla 1), los cuales conocen de primera mano los pormenores de esta.

Tabla 1. Usuarios de la vía.

Personas encuestadas	Cantidad
Conductores de vehículos pesados	40
Conductores de servicio público	40
Personas que viven o trabajan en la vía	20
Total encuestados	100

La primera pregunta de esta encuesta indaga sobre el tipo de accidente más frecuente de los vehículos pesados que transitan esta vía, la Fig. 1 muestra que los accidentes relacionados con la estabilidad de los vehículos pesados como lo son el volcamiento y la salida de la pista son los más frecuentes.

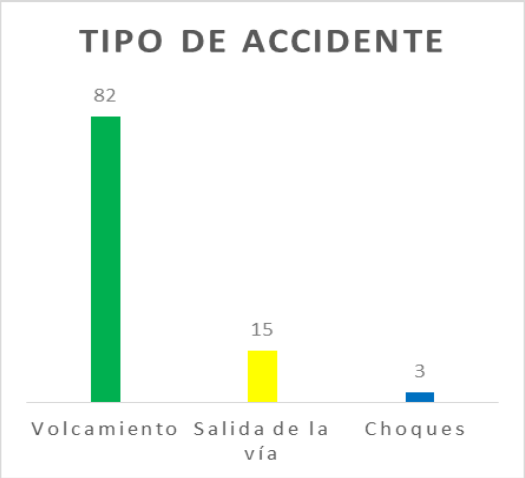


Figura 1. Tipos de accidentes más frecuentes en la vía Cúcuta - Pamplona.

Otro aspecto importante en la presente encuesta fue detallar los puntos críticos de la vía, se determinaron nueve puntos críticos con riesgo de accidentalidad por volcamiento y salida de la vía (Fig. 2), siendo los puntos críticos con mayor peligrosidad para los usuarios de la vía, Las S de Corozal, La entrada a Pamplonita, El Diamante, las Cocalinas, de los cuales algunos coinciden con los indicados por la Policía de Tránsito y Transporte y hay otros que también representan especial cuidado como:

- Kilómetro 81+000, denominado La Entrada a Pamplonita,
- Kilómetro 84+550, denominado El Rincón de los Caballos,
- Kilómetro 87+220, denominado La Miguelera,
- Kilómetro 124+100, denominado las S de Corozal,

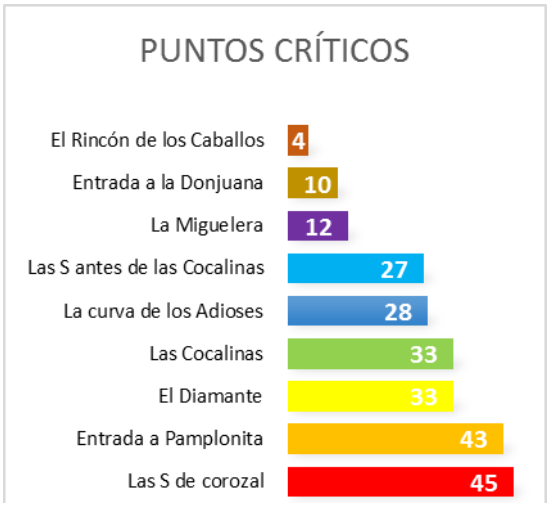
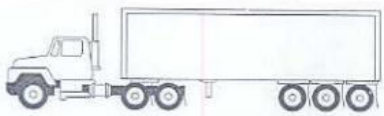


Figura 2. Puntos críticos de accidentalidad de la vía Cúcuta – Pamplona.

De acuerdo con los usuarios de la vía, estos trayectos requieren de especial cuidado por parte de los conductores, ya que se requiere de disminuciones altas de velocidad en pequeños trayectos y alta pericia de los conductores al transitar por ellos. Estos aspectos son más críticos cuando por estas vías transitan conductores nuevos, los cuales argumentan que la señalización vial no es la adecuada para la peligrosidad que estos puntos representan en relación a este tipo de vehículos.

Otro aspecto importante para el presente trabajo fue determinar, es el tipo de vehículos pesados de carga con mayor incidencia o probabilidad de accidentes de la vía Cúcuta – Pamplona, al respecto se observó que el vehículo más propenso a los accidentes es el tracto-camión, como se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipo de vehículos pesados que presenta mayor accidentalidad.

Tipo de vehículo	Porcentaje (%)
Tracto-camión 	87
Camión de 5 o 6 ejes	13
Total Encuestados	100

Cabe resaltar, que los vehículos tipo Tracto-camión son más propensos al volcamiento por ser articulados, más largos, y más pesados en relación con los otros vehículos. Otros factores que influyen en el vuelco de estos vehículos son: las condiciones geométricas de la vía, el desempeño del vehículo y el comportamiento o maniobrabilidad del conductor Grislis (2010).

Posterior a ello, se pretendía encontrar que factores de riesgo tienen mayor influencia en la accidentalidad de vehículos pesados, y se observó que la alta velocidad para tomar una curva es la que presentaba mayor frecuencia como lo describe la Fig. 3.

Los encuestadores afirmaban que las altas velocidades se debían a la señalización incorrecta en estos trayectos, lo que conlleva tomar estas curvas sin mayor precaución y su vez ocasionar accidentes. También deducían, que en la mayoría de los casos la alta velocidad iba acompañada de maniobras peligrosas del conductor cuando desconocía la vía e intenta evitar los accidentes.

Otro factor determinante es la falta de pericia del conductor al afrontar cada punto crítico, debido a que estos vehículos requieren un mayor espacio para transitar por su longitud y pueden generar molestias a otros usuarios de la vía Güemez (2013).

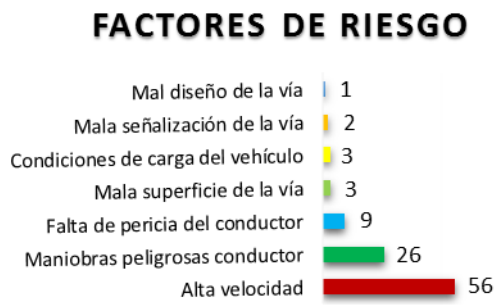


Figura 3. Factores de riesgo que influyen en la accidentalidad de vehículos pesados.

Otro factor importante a la hora de estudiar los accidentes de tránsito son las causas que lo producen, ya que de esta forma se pueden buscar soluciones que nos ayuden a dismunirlos o eliminarlos.

Según García *et al.,* (2012), estas causas pueden ser analizadas con tres momentos fundamentales: problemas evidentes que requieren un estudio superficial, problemas semiprofundos que necesitan un poco mas de investigación y los problemas profundos en donde se evalua desde el más minimo detalle para encontrar su causa final.

Cuando se inicío la busqueda de la información de accidentalidad en esta vía, se observó que todos los accidentes son tratados como estudio superficial, es decir, que su investigación no era a fondo, lo que conlleva al desconocimiento de sus causas reales y a la falta de registros actualizados con su detallada información, por esta razón, se optó por desarrollar este estudio de accidentalidad.

Según Güemez (2013), uno de los aspectos que podrían estudiarse para esclarecer las causas del accidente es el estudio del comportamiento dinámico del vehículo, condiciones de este, condiciones de la via, entre otros.

En la actualidad los accidentes de vehículos pesados no son frecuentes en esta vía, pero son de especial interes las diferentes consecuencias o efectos que causan. En la Fig. 4, se observa que la principal consecuencia que presentan estos accidentes es la pérdida de mercancia, sin dejar de lado los heridos ni las perdidas humanas.

Las perdidas de la mercancia afectan económicamente a los propietarios de la carga transportada, los consumidores o clientes finales de los productos, los conductores de vehículos pesados que deben en algunas ocaciones que responder por los daños causados tanto del vehículo como de la carga transportada y por ultimo las empresas aseguradoras de los vehículos.

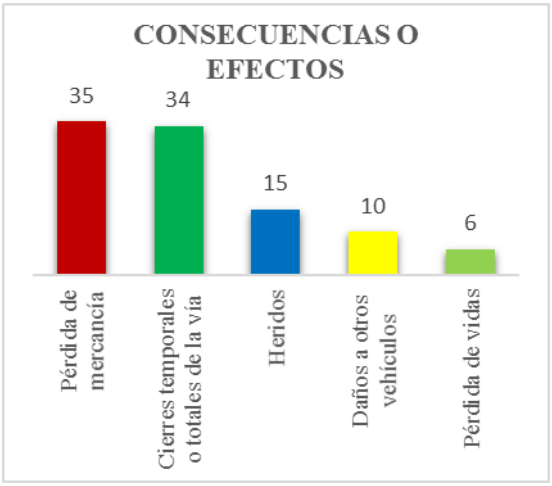


Figura 4. Consecuencias o efectos que producen los accidentes.

Otra consecuencia que afecta en gran proporción son los cierres temporales o totales de las vías, ya que perjudican la movilidad de los demás usuarios que transitan por la vía y a su vez retrasa los tiempos de llegada a sus destinos.

La pérdida de vidas es una consecuencia de gran importancia debido a que los accidentes de tránsito son uno de los principales responsables de los índices de mortalidad en Colombia según el Ministerio de Salud (MinSalud, 2015), ocupando el segundo lugar, con un porcentaje del 18,81% de la totalidad de las muertes en el año 2014. El primer puesto de mortalidad lo ocupan las agresiones (homicidios).

En algunos casos los accidentes pueden ocasionar daños a otros vehículos, que a su vez pueden causar heridos y muertos, esto disminuye la seguridad vial de las personas que transitan por la vía.

Grislis (2010) asegura que todas estas consecuencias ocasionadas por accidentes de vehículos pueden reducirse si:

1. Se conduce de forma adecuada respecto a las condiciones de carga, diseño geométrico de las carreteras, parámetros técnicos de los vehículos, condiciones climáticas y condiciones superficiales la vía.
2. Si todas las personas que transitan en la vía siguen a cabalidad las señales de tránsito y conducen con prudencia y precaución.

4. CONCLUSIONES

Al analizar los diferentes aspectos relacionados con el comportamiento de los vehículos pesados en la vía Cúcuta – Pamplona, se pudo deducir que existen problemas de seguridad vial relacionados con la accidentalidad por volcamiento y salida de la vía de estos vehículos. Se encontraron nueve puntos críticos de accidentalidad y se observó que estos accidentes se presentan debido a: las altas velocidades para tomar una curva, falta de pericia y maniobras peligrosas del conductor asociadas con el mal estado de la vía, la falta de demarcación en algunos trayectos y la carencia de señalización vial cuando los conductores no conocen la vía.

Estos accidentes traen consigo efectos secundarios como: cierres temporales o totales de la vías, pérdida de mercancías, heridos, muertos y daños a otros vehículos, que pueden afectar directa o indirectamente a los usuarios de la vía y a la comunidad nortesantandereana ya que estos vehículos representan la mayor parte del transporte de mercancías de la región.

También se determinó que el vehículo más propenso a accidentalidad por volcamiento es el tracto-camión, debido a que son articulados, más largos y más pesados que la mayoría de los vehículos, lo cual requiere una mayor maniobrabilidad por parte del conductor y más espacio para transitar con referencia al vehículo.

5. TRABAJOS FUTUROS

El presente trabajo permitió identificar nueve puntos críticos de accidentalidad por volcamiento de la vía Cúcuta - Pamplona, los cuales serán analizados posteriormente utilizando el modelo de estabilidad desarrollado por Moreno *et al.,* (2018a), y determinar los límites de velocidad segura para cada punto sin que ocurra volcamiento o salida de la vía.

REFERENCIAS

CAN. (2016) Accidentes de tránsito en la Comunidad Andina de Naciones..

Chu, D., Li, Z., Wang, J., Wu, C., & Hu, Z. (2018). Rollover speed prediction on curves for heavy vehicles using mobile smartphone Measurement, *130*, 404-411.

García Depestre, R. A., Delgado Martínez, D. E., Díaz García, E. E., & García Armenteros, R. R. (2012). Caracterización de la accidentalidad vehicular y análisis de las causas en la provincia de Villa Clara, Cuba. *Dyna*, *79*(175).

Grislis, A. (2010). Longer combination vehicles and road safety. Transport, 25(3), 336-343.

Güemez Shedden, C. R. (2013). Comportamiento dinámico de los vehículos de carga pesada en el cantón de San José (2011-2012). Infraestructura Vial Vol. 15 Núm. 26.

Jabour, C. C. (2010). Custos dos Acidentes nas rodovias federais, avaliando seus impactos sócio-econômicos para o país e efetuando sua aplicação na engenharia rodoviária.

Moreno, G. G., Vieira, R. S., Martins, D. (2018). Highway designs: effects of heavy vehicles stability. Revista DYNA, ISSN 0012-7353. 2018. v. 85 (No 205). pp. 205-210. DOI: 10.15446/dyna.v85n205.69676

Moreno, G. G., Nicolazzi, L., Vieira, R. S., Martins, D. (2018a). Stability of Long Combination Vehicles. International Journal of Heavy vehicle Systems, ISSN online: 1741-5152. ISSN print: 1744-232X. v. 25 (No 1). (2018) pp. 113-131. DOI: 10.1504/IJHVS.2018.10011111

MinSalud, M. D. (2015). Mortalidad y lesiones por accidentes de transporte en Colombia, 2013-2014. 1-39.

Policía Nacional, (2018), Accidentes de Tránsito, Vía Cúcuta - Pamplona, Policía Nacional, Dirección de Tránsito y Transporte, Seccional Norte de Santander, Colombia, 2018, 1-2

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

SÍNTESIS ÓPTIMA DE UN MECANISMO DE THEO JANSEN

OPTIMAL SYNTHESIS OF A THEO JANSEN MECHANISM

MSc. Neider Nadid Romero Núñez[*], PhD. Gonzalo Moreno Contreras[**], PhD. Elkin Flórez[**], PhD. Cesar Augusto Peña Cortes[**]

[*] Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería, Colombia.
PBX +57 094 7860146 - Ext. 241- Cel. (+57) 3013583684.
E-mail: neider.nadidr@upb.edu.co.
[**] Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona - Colombia.
E-mail: gmoren@unipamplona.edu.co

Resumen: El presente trabajo versa sobre la síntesis óptima de un mecanismo de Theo Jansen mediante el desarrollo de un algoritmo de optimización basado en la metodología enseñanza y aprendizaje, donde el objetivo de optimización es lograr una trayectoria de marcha aproximada con temporización prescrita. Para conseguir este objetivo el problema es formulado de forma robusta utilizando coordenadas naturales y operando dentro del cuerpo de los números complejos. Finalmente el procedimiento propuesto es implementado en Matlab®, y los resultados comparados con los encontrados en la literatura.

Palabras clave: Mecanismo de Theo Jansen, síntesis óptima, algoritmo basado en la enseñanza y el aprendizaje.

Abstract: The present work deals with the optimal synthesis of a Theo Jansen mechanism through development of a Teaching-Learning Based Optimization Algorithm (TLBO), where the objective of optimization is to achieve an approximate walking trajectory with prescribed timing. To achieve this goal, the problem is formulated in a robust way using natural coordinates and operating within the field of complex numbers. Finally, the proposed procedure is implemented in Matlab® and the results purchased with those found in the literature.

Keywords: Theo Jansen mechanism, optimal synthesis, teaching learning based algorithm.

1. INTRODUCCIÓN

El mecanismo de Theo Jansen es un eslabonamiento de ocho barras que simula la marcha de un cuadrúpedo y puede ser utilizado en aplicaciones de robots móviles (Patnaik & Umanand, 2016). Esté mecanismo fue concebido por el escultor cinético holandés Theo Jansen y utilizado en sus esculturas cinéticas llamadas bestias del viento (Giesbrecht, 2010).

A continuación, se muestran algunos trabajos relevantes sobre el mecanismo de Theo Jansen y mecanismos de marcha en general. En Kim & Kim, (2011) se utiliza un algoritmo de enjambre de partículas para encontrar las dimensiones optimas de un cangrejo robot basado en un mecanismo de

cuatro barras y un mecanismo de Theo Jansen. Giesbrecht *et al.,* (2012), utilizan una técnica de optimización multiobjetivo para minimizar la energía en el eslabón de entrada y maximizar la longitud recta de la trayectoria de la pata de la bien conocida escultura cinética bestia del viento. En Nansai, Elara, & Iwase, (2013) es realizado un análisis dinámico de un cuadrúpedo basado en el mecanismo de Theo Jansen, obteniendo como resultado la variación del torque de entrada y las fuerzas de restricción normales a la trayectoria de marcha tanto en las patas delanteras como en las patas traseras. También un análisis cinemático y dinámico usando el método bond graph es presentado en Patnaik & Umanand, (2016), donde la cinemática directa es resuelta por medio del método de intersección de círculos y donde dinámica inversa es resuelta usando mecánica lagrangiana. El análisis cinemático por medio de ecuaciones de cierre de lazo es realizado en Mohsenizadeh & Zhou, (2015), donde el método es validado por medio de estudio de movimiento de SolidWork. En Wu & Yao, (2018) es propuesto un nuevo mecanismo caminante con topología variable el cual puede cambiar la trayectoria de marcha.

Para enfrentar el presente problema, se modela la cinemática de posición del mecanismo en coordenadas naturales y el cómputo es realizado mediante el método de bilateración, operando dentro del cuerpo de los complejos. De esta forma la función objetivo es formulada mediante el uso del operador hermítico conjugado el cual hace que la función objetivo sea un número real. Finalmente, un algoritmo basado en la enseñanza y aprendizaje es implementado en Matlab® y los resultados comparados con los encontrados en la literatura.

2. ANÁLISIS DE POSICIÓN DEL MECANISMO DE THEO JANSEN

El análisis de posición es realizado usando coordenadas naturales y el método de bilateración, con el propósito de obtener una formulación compacta y de fácil implementación. Para los lectores no familiarizados con las coordenadas naturales y método de la bilateración se recomienda consultar (Jalón & Bayo, 1994; Avello, 2014; Nicolas Rojas, 2012; Nicolás Rojas & Thomas, 2011; Romero, 2014; Neider, 2016; Romero, *et al*., 2017; Romero *et al*., 2018).

La Fig. 1 muestra un esquema del mecanismo de Theo Jansen modelado mediante coordenadas naturales, donde P corresponde al punto del acoplador o pata que hace contacto con el suelo y los puntos A y B están fijos al chasis del Theo Jansen.

Para este mecanismo el vector de coordenadas naturales es

$$q = \{A \quad B \quad C \quad D \quad E \quad F \quad G \quad P\}^T \qquad (1)$$

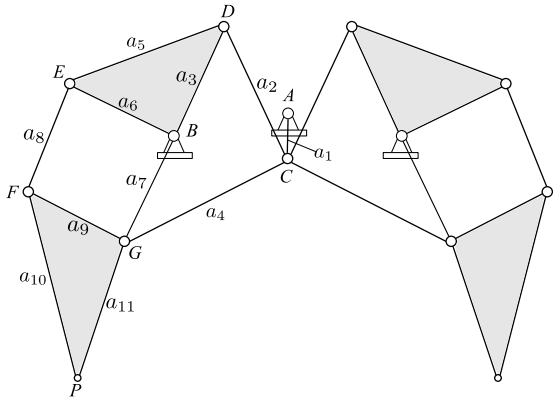


Fig. 1 Modelado del mecanismo de Theo Jansen usando coordenadas naturales.

2.1 Bilateración

La bilateración consiste en determinar un punto de un triángulo, conocidos dos puntos y dos distancias, como se detalla a continuación.

Sea $d_{A,B}, d_{A,C}, d_{B,C}$ las distancias del triángulo de la Fig. 2 y $s_{A,B}, s_{A,C}, s_{B,C}$ las distancias al cuadrado respectivamente.

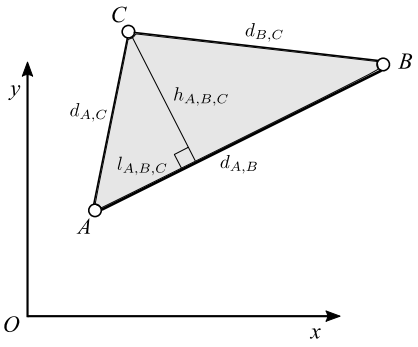


Fig. 2 Parámetros de bilateración y modelado de un triángulo usando coordenadas naturales.

Se define la matriz de bilateración del triángulo como:

$$N_{A,B,C} = \begin{bmatrix} \frac{l_{A,B,C}}{d_{A,B}} & -\frac{h_{A,B,C}}{d_{A,B}} \\ \frac{h_{A,B,C}}{d_{A,B}} & \frac{l_{A,B,C}}{d_{A,B}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde,

$$\frac{l_{A,B,C}}{d_{A,B}} = \frac{s_{A,C} + s_{A,B} - s_{B,C}}{2s_{A,B}}$$

$$\frac{h_{A,B,C}}{d_{A,B}} = \frac{t_{A,B,C}\sqrt{4s_{A,C}s_{A,B}^2 - (s_{A,C} + s_{A,B} - s_{B,C})^2}}{2s_{A,B}}$$

$$t_{A,B,C} = \{1, -1\}$$

por lo tanto

$$N_{A,B,C} = \begin{bmatrix} \frac{s_{A,C} + s_{A,B} - s_{B,C}}{2s_{A,B}} & -\frac{h_{A,B,C}}{d_{A,B}} \\ \frac{h_{A,B,C}}{d_{A,B}} & \frac{s_{A,C} + s_{A,B} - s_{B,C}}{2s_{A,B}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

lo cual permite computar el punto C mediante la ecuación

$$C = A + N_{A,B,C}(B - A) \quad (4)$$

la cual es compacta y de fácil implementación.

2.2 Determinación de las coordenadas naturales del mecanismo de Theo Jansen por bilateración

El punto C perteneciente al eslabón de entrada del mecanismo es determinado por la ecuación

$$C = \begin{Bmatrix} x_A + a_1 \cos\varphi \\ y_A + a_1 \sin\varphi \end{Bmatrix} \quad (5)$$

donde φ es el ángulo de entrada. Para determinar el resto de coordenadas naturales se hace la siguiente secuencia de ecuaciones de bilateración

$$D = C + N_{C,B,D}(B - C) \quad (6)$$

$$G = C + N_{C,B,G}(B - C) \quad (7)$$

$$E = D + N_{D,B,E}(B - D) \quad (8)$$

$$F = E + N_{E,G,F}(G - E) \quad (9)$$

$$P = F + N_{F,G,P}(G - F) \quad (10)$$

y puesto que cada ecuación de bilateración tiene dos posibles soluciones, el mecanismo tendría 32 modos de ensamble o configuraciones posibles.

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

La Fig. 3 muestra que los parámetros de diseño son números reales, y para un ángulo de entrada dado el punto P de la pata del mecanismo pertenece en general a un espacio complejo bidimensional, luego el error de síntesis ε es calculado como

$$\varepsilon = \left({}^dP - P\right)^* \left({}^dP - P\right) \quad (11)$$

donde $*$ es el conjugado hermítico y ${}^dP$ es el punto deseado. Esto permite que la función objetivo sea un número real.

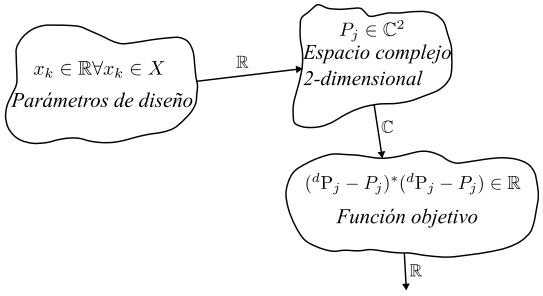


Fig. 3 Calculo de la función objetivo.

El problema de optimización es formulado como:

$$\begin{aligned} &\min f(X) = \sum_{j=1}^{n} \left({}^dP_j - P_j\right)^* \left({}^dP_j - P_j\right) \\ &\text{s.t: a) } 2\left[\min(a_1,a_2,a_3,f) + \max(a_1,a_2,a_3,f)\right] - (a_1 + a_2 + a_3 + f) < 0 \\ &\quad \text{b) } \min(a_1,a_2,a_3,f) - a_1 = 0 \\ &\quad \text{c) } x_k \in [Li_k, Ls_k] \forall x_k \in X \end{aligned} \quad (12)$$

donde $f = \|B - A\|$ y el vector de parámetros de diseño es:

$$X = \{a_1 \quad \cdots \quad a_{11} \quad t_{C,B,D} \quad \cdots \quad t_{F,G,P}\}^T \quad (13)$$

la restricción a) corresponde a la condición de Grashof, b) garantiza que el eslabón de entrada sea el más corto y c) son los valores límites de las variables de diseño. El problema de optimización puede ser escrito de forma irrestricta como

$$\min f(X) = \sum_{j=1}^{n} \left({}^{d}P_j - P_j\right)^{*} \left({}^{d}P_j - P_j\right) + P(X) \quad (14)$$

$$P(X) = \rho_1 \cdot g_1(X) + \rho_2 \cdot g_2(X) \quad (15)$$

$$g_1(X) = \left[\max\left(0, r_1(X)\right)\right]^2 \quad (16)$$

$$g_1(X) = \left[\min\left(a_1, a_2, a_3, f\right) - a_1\right]^2 \quad (17)$$

donde $P(X)$ es una función de penalidad, ρ_1, ρ_2, ρ_3 son constantes de penalidad y

$$r_1(X) = 2\left[\min\left(a_1, a_2, a_3, f\right) + \max\left(a_1, a_2, a_3, f\right)\right] - \left(a_1 + a_2 + a_3 + f\right)$$

3.1 Algoritmo de optimización basado en la enseñanza y aprendizaje

Un algoritmo de optimización basado en la enseñanza y aprendizaje (TBLO) por sus siglas en inglés, es un algoritmo inspirado en el proceso de enseñanza y aprendizaje de un aula de clase, en el cual un profesor transmite o enseña a los estudiantes y luego en una segunda fase los estudiantes aprenden entre ellos. En el TBLO si un estudiante supera al profesor, este se convierte en el nuevo profesor (Rao, 2016). En la Fig. 4 se muestra un diagrama de flujo simplificado de un algoritmo basado en la enseñanza y aprendizaje.

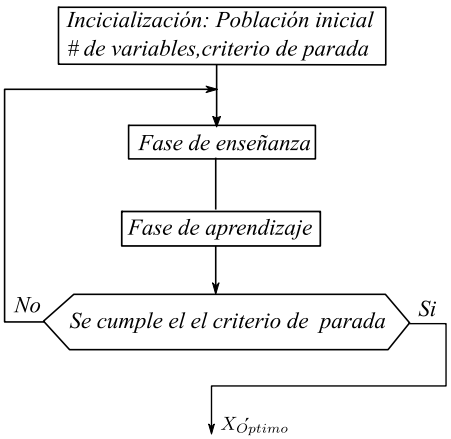


Fig. 4 Diagrama de flujo de un TBLO.

Cabe destacar que unas de las ventajas principales del TBLO es que no necesita de ningún parámetro adicional aparte de la población inicial. Además, que en la práctica se pueden tratar problemas de optimización altamente complejos, presentando una convergencia relativamente rápida.
El problema aquí formulado contiene variables de optimización reales y enteras, donde estas últimas en el TBLO son tratadas como números reales y luego transformadas a enteros, esto con el propósito de no modificar el algoritmo.

4. RESULTADOS

El procedimiento fue implementado en Matlab® utilizando un procesador Intel i5-4300U CPU @ 2.5 GHz. Para la optimización se tomaron los puntos de precisión

$${}^{d}P_j = \left\{\begin{matrix}(-70.6706,-89.6428),(-58.0743,-91.76),(-45.478,-91.76)\\(-32.8817,-91.76),(-20.2854,-91.76),(-7.6891,-90.3894),\\(-40,-70)\end{matrix}\right\}$$

correspondientes a los ángulos de entrada

$$\varphi_j = \left\{-90° \quad -54° \quad -18° \quad 18° \quad 54° \quad 90° \quad 180°\right\}$$

Estos puntos corresponden al mecanismo propuesto por Theo Jansen, los cuales se muestran en la Fig. 5.

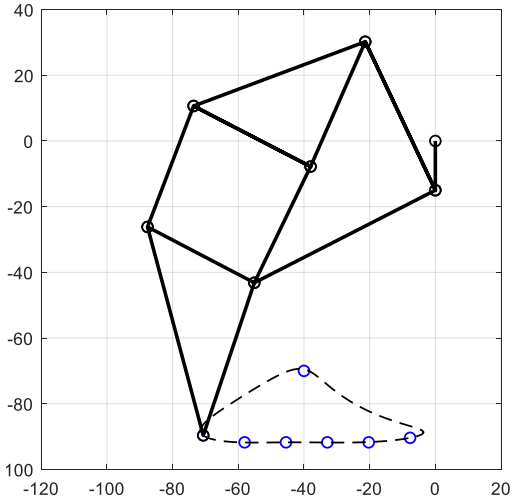


Fig. 5 Trayectoria del mecanismo propuesto por Theo Jansen.

Límites de las variables de diseño:

$$a_1, a_2, \cdots, a_{11} \in [0, 60]$$
$$x_A, x_B \in [-70, 70]$$
$$y_A, y_B \in [-10, 10]$$
$$t_{C,B,D}, \cdots, t_{F,G,P} \in \{-1, 1\}$$

En la Fig. 6, Fig. 7 y Fig. 8 se muestran tres mecanismos óptimos encontrados luego de varias pruebas con una población de 100 y tiempo de computo de una hora.

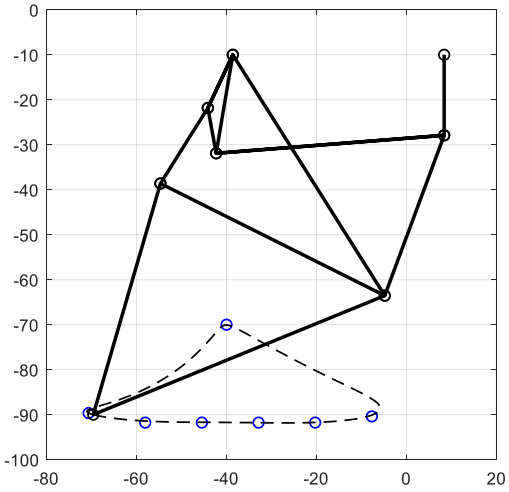


Fig. 6 Trayectoria del mecanismo optimizado 1.

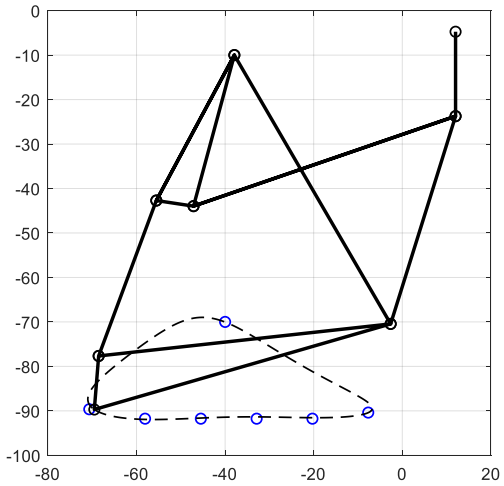


Fig. 7 Trayectoria del mecanismo optimizado 2.

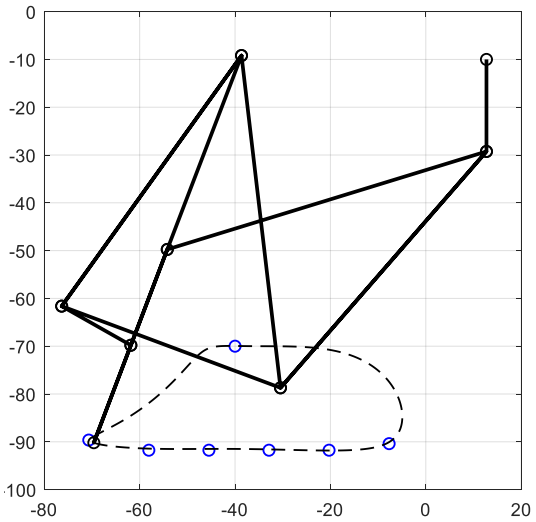


Fig. 8 Trayectoria del mecanismo optimizado 3.

Una de las características geométricas que se pueden apreciar en estas tres soluciones es que el mecanismo no es tan simétrico como el propuesto por Theo Jansen, pudiendo decir que la simetría juega un papel importante desde el punto de vista estético. Cinéticamente las tres soluciones son viables ya que no presentan posiciones singulares y ningún otro problema cinemático en todo el recorrido de la trayectoria.

5. CONCLUSIONES

El procedimiento de modelado y optimización propuesto es robusto y de fácil implementación computacional, esto permitió encontrar soluciones óptimas en tiempos relativamente cortos. También se muestra en este trabajo que la combinación de las coordenadas naturales con el método de bilateración permite una formulación compacta y sistemática de la cinemática de poción para un mecanismo complejo como el aquí tratado. Una pregunta que deja este trabajo es ¿Cómo incluir requerimientos estéticos en la formulación del problema de optimización?, siendo esto un aspecto a tratar en futuras investigaciones sobre el mecanismo de Theo Jansen o en mecanismos caminantes en general.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo es fue apoyado por el CIDI de la UPB-Montería y el programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona.

REFERENCIAS

Avello, A. (2014). *Teoría de Máquinas* (2nd ed.). Pamplona, España.

Giesbrecht, D. (2010). Design and Optimization of a One-Degree-of- Freedom Eight-Bar Leg Mechanism for a Walking Machine, 87.

Giesbrecht, D., Wu, C. Q., & Sepehri, N. (2012). Design and optimization of an eight-bar legged walking mechanism imitating a kinetic sculpture, "Wind Beast." *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, *36*(4), 343–355.

Jalón, & Bayo, E. (1994). *Kinematic and dynamic simulation of multibody systems*. *Mechanical Engineering Series, Springer, …*. Springer-Verlag.

Kim, S.-W., & Kim, D.-H. (2011). Design of Leg Length for a Legged Walking Robot Based on Theo Jansen Using PSO. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, *21*(5), 660–666. https://doi.org/10.5391/JKIIS.2011.21.5.660

Mohsenizadeh, M., & Zhou, J. (2015). Kinematic Analysis and Simulation of Theo Jansen Mechanism, (December).

Nansai, S., Elara, M. R., & Iwase, M. (2013). Dynamic analysis and modeling of Jansen mechanism. *Procedia Engineering*, *64*, 1562–1571. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.238

Neider, R. (2016). Análisis de posición de un mecanismo de cuatro barras utilizando coordenadas naturales. *Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecánica*, *20*, 83–90.

Patnaik, L., & Umanand, L. (2016). Kinematics and dynamics of Jansen leg mechanism: A bond graph approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *60*, 160–169. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.10.003

Rao, R. V. (2016). *Teaching Learning Based Optimization Algorithm*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22732-0

Rojas, N. (2012). *Distance-Based Formulations for the Position*. UNIVERSITAT POLIÈCNICA DE CATALUNYA.

Rojas, N., & Thomas, F. (2011). Distance-based position analysis of the three seven-link Assur kinematic chains. *Mechanism and Machine Theory*, *46*(2), 112–126. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2010.10.004

Romero, N. (2014). *Sítese Estrutural e Otimização Dimensional de Mecanismos de Direção*. Universidade Federal de Santa Catarina.

Romero, N., Flórez, E., & Mendoza, L. (2017). Optimization of a multi-link steering mechanism using a continuous genetic algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *31*(7), 3183–3188. https://doi.org/10.1007/s12206-017-0607-1

Romero Nuñez, N. N., & Flórez, E. G. (2018). Position analysis of a mechanism Stephenson type I using natural s, *85*(204), 91–97. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85204.60539

Wu, J., & Yao, Y. an. (2018). Design and analysis of a novel walking vehicle based on leg mechanism with variable topologies. *Mechanism and Machine Theory*, *128*, 663–681. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.07.008

EVALUACIÓN NO INVASIVA DEL DESARROLLO MUSCULAR DE DEPORTISTAS

NON-INVASIVE EVALUATION OF THE MUSCULAR DEVELOPMENT OF ATHLETES

Dra. Rosario Aldana Franco, Dr. Ervin Jesús Álvarez Sánchez, Dr. Andrés López Velázquez, Dr. Fernando Aldana Franco, MIE José Gustavo Leyva Retureta, IM Eréndira Covix Gracia

[*] **Universidad Veracruzana,** Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Cuerpo Académico Ingeniería Transdisciplinar.
Lomas del Estadio S/N, Xalapa, Veracruz, México.
Teléfono y Fax: 52 228 8421757.
E-mail: raldana@uv.mx, eralvarez@uv.mx, andlopez@uv.mx, faldana@uv.mx, jleyva@uv.mx , covixg@gmail.com

Resumen: Los músculos contribuyen al movimiento, además de proporcionar protección a los huesos, venas, arterias y órganos, además dan forma al cuerpo. En el presente artículo, se describe un método no invasivo para evaluar el estado funcional de los músculos con base en la temperatura muscular, usada para dar seguimiento al desempeño de atletas. El estudio se desarrolló con diferentes grupos de sujetos, cada uno con una actividad deportiva distinta (corredores y físico-constructivistas) y, a su vez, con frecuencia de entrenamiento distinto (intensa y moderada), a los que se aplicó una prueba muscular no invasiva; con el análisis estadístico de los datos obtenidos fue posible caracterizar, de manera diferencial, el comportamiento muscular en términos de calor liberado, correspondientes a cada grupo experimental.

Palabras clave: Músculos, temperatura muscular, evaluación.

Abstract: The muscles contribute to the movement, in addition to providing protection to the bones, veins, arteries and organs, in addition they shape the body. In the present article, we describe a non-invasive method to evaluate the functional state of the muscles based on the muscle temperature used to monitor the performance of athletes. The study was developed with different groups of subjects, each with a different sport activity (runners and physicist-constructivists) and, in turn, often with different training (intense and moderate), to which a muscle test was applied not invasive; the statistical analysis of the obtained data it was possible to characterize, in a differential way, the muscular behavior in terms of heat released, corresponding to each experimental group.

Keywords: Muscles, muscle temperature, evaluation.

1. INTRODUCCIÓN

El cuerpo humano, en especial el sistema locomotor es responsable del movimiento, está formado por una red de sistemas relacionados entre sí para funcionar en conjunto. Los músculos integran parte de este sistema que coadyuvan al movimiento, protección y forma. En el presente trabajo se estudió su comportamiento como un sistema termodinámico, músculo–piel–ambiente para evaluar el desarrollo muscular de deportistas de alto rendimiento.

La relación entre la variación de la temperatura de los músculos durante una contracción o reposo y el estado funcional del músculo fue la base para estudiar de manera no invasiva y sin afectar el estado físico del sujeto o su entrenamiento. Los grupos experimentales por la disciplina que cultivan, corredores y fisicoculturistas, a su vez subdivididos en altamente entrenados y medianamente entrenados. Las series de temperaturas se analizaron estadísticamente para establecer diferencias significativas sobre el comportamiento en términos de calor liberado, en distintas condiciones experimentales.

2. MARCO TEORICO

La práctica deportiva propicia la modificación de los procesos energéticos para mantenerlo en movimiento (Lesur, Ortega, Saldívar y Cinta, 2008), en este trabajo se centró la atención en el comportamiento termodinámico del bíceps del brazo dominante, durante el reposo-contracción-reposo.

La contracción muscular es un proceso que se inicia con un impulso nervioso motor, detonado por el potencial de acción, para el movimiento ocurre (Wilmore y Costill, 2007).

Desde el punto de vista fisiológico, la fuerza es la capacidad de producir tensión en el músculo al activarse (González Badillo, 2000).

2.1 Desarrollo Muscular y Deporte.

El rendimiento de un atleta depende de la genética de sus fibras musculares, pero sus fibras pueden ser modificadas con ejercicio constante y prolongado; el entrenamiento aeróbico prolongado puede modificar las fibras del tipo de II a I, para la modificar la contracción rápida a lenta; el entrenamiento de fuerza puede aumentar el tamaño de las fibras del tipo II (Bassani et al, 2013).

2.2 Regulación térmica del músculo y el ejercicio

El cuerpo humano es un sistema homeotérmico, aunque la temperatura varía de un momento a otro, estas fluctuaciones son inferiores a 1C°, salvo en el caso de la ovulación, cuando las temperaturas pueden variar más de 5°C (Wilmore y Costill, 2007).

La homeotermia, posibilita el mantenimiento de la velocidad de las reacciones químicas en el organismo, la temperatura central del músculo se refiere a los contenidos de la cabeza y cavidades torácica y abdominal, mientras que la temperatura superficial, se refiere a la parte del organismo que encuentra en contacto con el medio externo, como la piel, tejido celular subcutáneo y masa muscular (López Chicharro y Fernández Vaquero, 2006).

La temperatura corporal refleja la existencia de un equilibrio entre la producción y la pérdida de calor. Por tanto, gran parte de la energía que genera el cuerpo se degrada a calor; pues los tejidos metabólicamente activos producen calor que puede usarse para mantener la temperatura interna corporal (Maughan, 2003).

El calor del núcleo es transportado por la sangre hacia los músculos y la piel y se transfiera al medio ambiente por cualquiera de los cuatro mecanismos: conducción, convección, radiación y evaporación. (Wilmore y Costill, 2007).

Para este estudio se consideró el mecanismo de conducción, que es la transferencia de calor de molécula a molécula entre gases, sólidos y líquidos, pero principalmente en estos últimos; depende de la conductividad térmica de las sustancias en contacto, de la diferencia de temperaturas entre ellas (López y Fernández, 2006) y el grosor de la pared que separa a estas regiones.

2.3 Planteamiento del problema

Para los deportistas de alto rendimiento, que realizan entrenamiento constante para mejorar su desarrollo muscular y las personas que deciden

ejercitarse, es importante conocer si el entrenamiento o la rutina de ejercicio que han llevado a cabo está dando los resultados esperados y si dicha rutina está bien usada; así como observar la evolución, de manera sencilla y clara.

Para solucionar este problema se propuso que el patrón de temperatura de un músculo es un indicador de su estado funcional.

2.4 Hipótesis

La temperatura del músculo puede ser un indicador para la estimación de su estado en deportistas.

3. METODOLOGÍA

La metodología usada se resume en la figura 1, donde se especifican los grupos experimentales usados, integrados por varones de entre 19 y 24 años, 12 sujetos por cada grupo experimental, 48 en total.

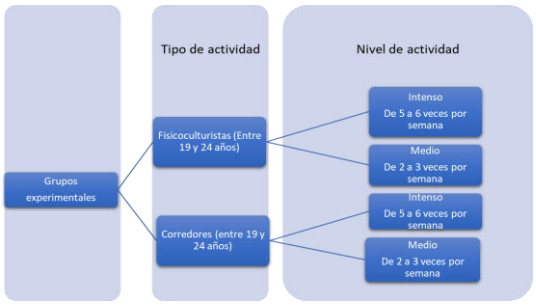


Fig. 1 Diseño experimental

Se registraron 4 temperaturas por segundo del bíceps braquial dominante, se guardaron en una base de datos (40 datos de la etapa pre-contracción, 25 para la contracción y finalmente 55 para la post-contracción) a 12 sujetos varones por cada grupo experimental, con edades entre 19 y 24 años, por ser esta edad la recomendada para iniciarse en los deportes de alto rendimiento, como los estudiados.

Los datos obtenidos se describieron estadísticamente y, a continuación, se realizó una ANOVA de dos vías con los factores "Tipo de actividad" (fisicoculturistas – corredores con entrenamiento alto y medio) y "Etapa experimental" (pre – cont - post).

4. RESULTADOS

Los resultados correspondientes a la descripción estadística por grupo experimental se muestran en la Tabla 1, en grados centígrados.

En la tabla 1 las siglas corresponden a corredores con alto entrenamiento (CAE), corredores con entrenamiento medio (CME), físicoculturistas con alto entrenamiento (FAE) y físicoculturistas con entrenamiento medio (FME). Se observó que el promedio de temperatura más alto correspondió a los grupos con más entrenamiento.

En la tabla 2 se muestran los resultados de la prueba ANOVA realizada a los datos de los grupos experimentales; se observaron diferencias significativas entre los grupos experimentales ($F_{5508,3} = 115.454$, $p < 0.001$) porque la respuesta de temperatura fue distinta para los cuatro grupos y, por tanto, fue posible determinar cuatro patrones de respuesta. También fue posible diferenciar, estadísticamente, entre las tres etapas experimentales ($F_{5508,2} = 9.046$, $p < 0.001$).

Tabla 1: Estadística descriptiva

	X±error	Mediana
CAE	30.36 ± 0.03	30.94
CME	29.65 ± 0.05	25.62
FAE	30.18 ± 0.03	30.38
FME	29.42 ± 0.03	29.81

Al realizar la prueba post hoc Student-Newman-Keuls, Los grupos CME, LAE y LME son distintos al grupo CAE, que se consideró el control, además de ser distintos entre sí; las etapas CONT y POST son distintas a la etapa PRE; al mismo tiempo hubo diferencias entre las etapas PRE y CON y POST del grupo LAE, mientras en la etapa PRE todos los grupos fueron distintos, en tanto que en la etapa CONT, sólo los grupos CAE y LAE fueron similares; en la etapa POST, sólo los grupos CAE y LAE fueron similares.

En la figura 2, se muestra una gráfica de las temperaturas de un sujeto del grupo de corredores que se entrenan con frecuencia CAE, donde se aprecian las etapas experimentales (pre-contracción, contracción y post-contracción).

Tabla 2: ANOVA de dos vías

	ETAPA EXPERIMENTAL				
Grupo	PRE	CONT	POST		
CAE	30.31 ± 0.06	30.41 ± 0.08	30.37 ± 0.05	30.37 ± 0.04	$F_{5508,3}$ = 115.454 p<0.001
CME	29.54 ± 0.06	29.74 ± 0.08	29.66 ± 0.05	29.65 ± 0.04	
FAE	29.98 ± 0.06	30.25 ± 0.08	30.29 ± 0.05	30.18 ± 0.04 *	
FME	29.30 ± 0.06	29.50 ± 0.08	29.47 ± 0.05	29.42 ± 0.04	
	29.79 ± 0.03	29.98 ± 0.04	29950 ± 0.03	$F_{5508,6}$ = 0.741 p = 0.616	
	$F_{5508,2}$ = 9.046 p < 0.001				

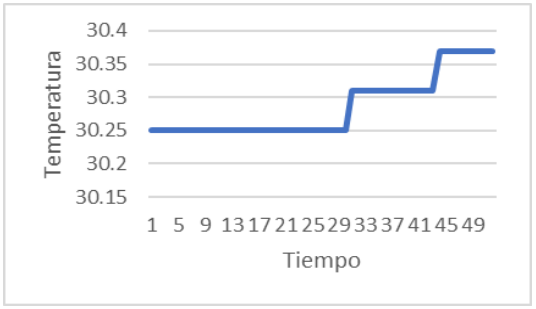


Fig. 2 Temperatura de un sujeto del grupo CAE

En la figura 3 se muestra la gráfica de temperatura de un corredor con entrenamiento medio (CME).

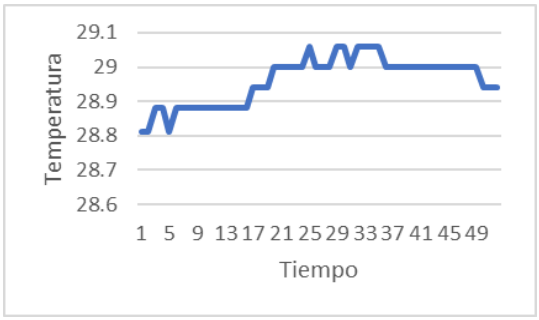


Fig. 3 Temperatura de un sujeto del grupo CME

En la figura 4, se muestra la gráfica de un fisicoculturista que se entrena con frecuencia (FAE) en las tres etapas experimentales.

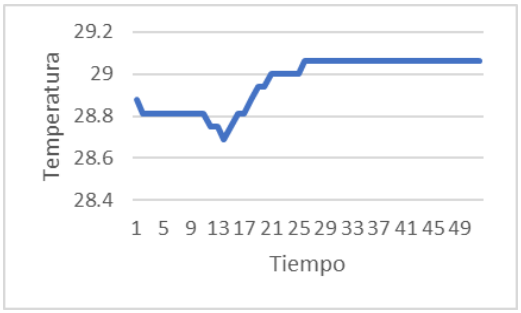


Fig. 4 Temperatura de un sujeto del grupo FAE

En la figura 5 se representó la temperatura de un físico culturista con entrenamiento medio (FME), en las tres etapas experimentales.

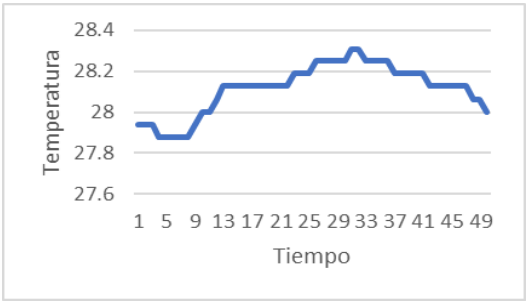


Fig. 5 Temperatura de un sujeto del grupo FME

Se puede apreciar que los patrones de temperatura son distintos, dependiendo del tipo de actividad y la frecuencia de su entrenamiento.

5. DISCUSIÓN

Las modificaciones debidas al entrenamiento son específicas de los músculos utilizados, y no ocurren en aquellos que no participan en el entrenamiento (Morán Bermejo, 2006), estas modificaciones tienen un impacto directo en la manera en que el músculo trabaja al realizar actividad física ya que sus adaptaciones son distintas dependiendo de la disciplina practicada, debido al tipo de actividad, su intensidad y a los músculos involucrados en ella.

Del mismo modo, Morán Bermejo (2009) establecieron que los deportistas de alto rendimiento que practican disciplinas de resistencia como maratón o ciclismo de ruta tienen fibras de tipo I superior al 60-65% del total, mientras que en

los deportistas de disciplinas de fuerza (como la lucha libre), sus músculos presentan porcentajes de fibras tipo II superiores al 65%. Por tanto, el entrenamiento puede inducir transiciones de unos tipos de fibras a otros para alcanzar los distintos patrones fibrilares que se observan en los deportistas, que indica una diferenciación entre el desarrollo muscular de cada deportista, dependiendo del deporte practicado, lo cual modifica también la respuesta de estos ante el movimiento y más específicamente, ante la contracción.

Por otra parte, la liberación de calor relacionada con la actividad deportiva es distinta, dependiendo de las características del músculo en cuestión. En las etapas experimentales establecidas, pre-contracción, contracción y post-contracción, se observaron diferencias no sólo en el aumento de temperatura sino en la forma en que esta aumentaba y de disipaba con respecto al tiempo.

Se observó el aumento de la temperatura mayor en los sujetos pertenecientes a los fisicoculturistas, en comparación con los corredores, sin embargo, la liberación de este calor después de la contracción fue más más largo en los corredores con entrenamiento frecuente, siendo para estos el tiempo de liberación post-contracción de 34.76 segundos para los altamente entrenados, en tanto que los fisicoculturistas, altamente entrenados y medianamente entrenados, mostraron un promedio de tiempo de liberación de calor post-contracción de 23.03 y 18.30 segundos, respectivamente.

Los corredores con entrenamiento medio presentaron un promedio de tiempo menor que los otros tres grupos de sujetos, siendo este de 14.52 segundos, un tiempo incluso por debajo de los fisicoculturistas. Esto muestra una distinción entre grupos no sólo por series de temperatura sino por comportamiento en cuanto a la liberación de calor después de la contracción, la cual se da de manera distinta según la actividad.

6. CONCLUSIONES

La temperatura resultó un buen indicador para caracterizar el estado y evolución de los músculos de deportistas masculinos, con entrenamiento alto y medio, con edades entre 19 y 24 años.

Los resultados obtenidos del tratamiento estadístico de las series de temperaturas de cada grupo de sujetos mostraron las diferencias existentes entre el comportamiento térmico de los músculos, antes, durante y después de una contracción, fue posible estimar el calor liberado, como indicador del desarrollo muscular en los deportistas, como resultado de su entrenamiento.

El patrón de temperatura muscular fue característico de cada grupo experimental, porque fueron distintos entre sí, porque se desarrolló un patrón diferente en cuanto al aumento de temperatura durante la contracción, y el tiempo necesario para el regreso a la temperatura basal, haciendo posible distinguir entre el tipo de actividad y el nivel de entrenamiento.

RECONOCIMIENTO

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por la beca para estudiante de Licenciatura concedida a la Ing. Eréndira Cóvix Gracia para realizar su tesis y a la Universidad Veracruzana por brindar el apoyo para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

Bassani, D. G., Arora, P., Wazny, K., Gaffey, M. F., Lenters, L. & Bhutta, Z. A. (2013) Financial incentives and coverage of child health interventions: A systematic review and meta-analysis. BMC Public Health, 13 Suppl 3 pp. S30.

González Badillo, J. J. (2000) *Concepto y medida de la fuerza explosiva en el deporte. Posibles aplicaciones al entrenamiento*. Revista entrenamiento deportivo, XIV (1), 5-16.

Lesur L, Ortega O, Saldívar C y Cinta V. (2008). *Anatomía, fisiología y salud*. Editorial Trillas. México. ISBN 13: 9789682484353

López Chicharro J y Fernández Vaquero A. (2006). *Fisiología del Ejercicio*. Tercera edición

Editorial médica panamericana. México. ISBN 978-950-06-8247-3

López, I.J. y Fernández, A. *Respuestas y adaptaciones neuroendocrinas al ejercicio.* En: Fisiología del Ejercicio. Madrid: Editorial Panamericana. 2006. 545-569.

Maughan RJ (2003). *Impact of mild dehydration on wellness and on exercise performance*. European Journal of Clinical Nutrition, 57(2), 19-23

Morán Bermejo M. *Tipos de fibras musculares*. En: López Chicharro J. Fernández Vaquero A. editores, Fisiología del ejercicio. Tercera edición. Madrid. Ed, Panamericana, 2009.

Wilmore J y Costill D. (2007). *Fisiología drl esfuerzo y el deporte*. Sexta edición. Editorial Paidotribo. Barcelona, España. ISBN 978-84-8019-916-2

.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ExPro: Exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior

ExPro: Exoskeleton for upper limb rehabilitation

Ing. Luis Miguel Méndez Moreno, Aída Daniela Becerra López, David Orlando Palencia Vergara, Juliana Orjuela García, Elizabeth Andres López Pérez

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Protos UN.
Bogotá
DC, Cundinamarca ,Colombia.
+057 3125015029, 3125015929
E-mail: protosun_bog@unal.edu.co.

Resumen: El Expro es un exoesqueleto de 3 grados de libertad, diseñado por un equipo interdisciplinar de estudiantes de ingeniería y medicina, creado con el objetivo de brindar asistencia en tratamientos de rehabilitación en los brazos. El Expro es controlado mediante una interfaz gráfica que envía información a un dispositivo de control y posteriormente a los servomotores; en esta interfaz se escoge el tipo de movimiento, el ángulo del movimiento, el número de series y la cantidad de repeticiones por serie, posteriormente se almacena esta información en la base de datos (toda la interfaz y la base de datos fueron programadas en Python). Los componentes mecánicos fueron diseñados en Inventor e impresos en 3D. La división de control consiste en una Raspberry Pi que recibe la información y la interpreta y la transmite a una pcb de control que manipula los servomotores de cada grado de libertad.

Palabras clave: *Palabras clave: Exoesqueleto, rehabilitación, impresión, 3D, terapia.*

Abstract: The ExPro is an exoskeleton with 3 degrees of freedom designed by a multidisciplinary team of medicine and engineering undergraduate students, created for providing assistance in rehabilitation treatments of arms. The Expro is controlled through a graphical interface that sends information to a control device and then to the servomotor; in this interface, the type and angles of movement and the configuration of sets and repetitions per routine are chosen, later this information is stored in the database (The entire interface and database were programmed in Python language). The mechanical components were designed in Autodesk Inventor software and 3D printed. The controlling section consist of a Raspberry Pi 3 that receives information, interprets and connects it to the control PCB, which turn manipulates the servomotors of each degree of freedom.

Keywords: *exoskeleton, rehabilitación, 3D printing, therapy*

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Convención de la ONU, 2006 la discapacidad se define como el resultado de la interacción entre las personas con deficiencias y las barreras debidas a la actitud o entorno donde es impedida su participación plena en igualdad de condiciones, entiéndase entonces por discapacidad deficiencias tanto físicas como mentales. De acuerdo a estudios estadísticos de la OMS a nivel mundial la cantidad de personas con alguna forma de discapacidad supera los mil millones de personas, un 15% de la población mundial, de los cuales 200 presentan dificultades considerables en su funcionamiento. Esta investigación enfatiza en las discapacidades físicas, particularmente en la regeneración de movilidad en miembro superior. El interés en la investigación de nace con el Síndrome Guillain Barré, en Colombia, según de la OMS, se registran por lo menos 242 casos anuales. Citando a la Organización mundial de la salud. Este síndrome provoca que el recubrimiento nervioso se deshaga y esto causa que haya pérdida total o parcial de movilidad del miembro afectado, el lado positivo es que esto es reversible mediante intensa fisioterapia hasta que el tejido nervioso se recupere y regrese a su estado inicial. El acceso a fisioterapia intensiva como la que requiere esta y muchas otras condiciones es difícil de lograr dado a que es un área de la medicina donde se requiere un especialista y mucho tiempo para múltiples terapias de rehabilitación. Atendiendo a estas falencias, se consolida la creación del ExPro, un exoesqueleto con tres grados de libertad orientado a la rehabilitación de miembro superior con manipulación asistida por el profesional pertinente, específicamente fisioterapeuta o terapeuta ocupacional, con el objetivo de hacer más efectiva la terapia, más sistemática y amigable tanto para usuario como para operador, ofreciendo interacción virtual mediante la interfaz gráfica diseñada y tres grados de seguridad a nivel mecánica, electrónico y digital.

2. MOTIVACIÓN

Un terapeuta en una jornada regular atiende un promedio de veinte pacientes, lo que suele implicar cansancio y desgaste tanto físico como mental, situación agravada con la diversidad de tratamientos a realizar y la complejidad de los mismos.

El ExPro es un proyecto que surge como una idea concebida por estudiantes de pregrado de la Universidad Nacional de Colombia, los cuales en un intento por mejorar generar un aporte colaborativo a la situación de salud previamente descrita deciden acudir a la asesoría de una terapeuta ocupacional del Hospital Universitario Nacional de Colombia, la cual guío la formulación de la problemática desarrollada durante el proyecto, resumida en una pregunta "¿cómo ayudar a los terapeutas a la hora de realizar una terapia con pacientes que padecen de inmovilidad total o parcial?, orientado de manera enfática en el caso del Guillain-Barré que fue el eje patológico que sentó las base de arranque del proyecto.

El síndrome de Guillain-Barré es un trastorno autoinmunitario donde el cuerpo del afectado se ataca a sí mismo, más explícitamente, el sistema inmunitario del cuerpo detecta como antígenos al recubrimiento del sistema nervioso, por lo cual decide atacar, generando hinchazón y pérdida de movilidad parcial o total.

Como resultado de esta problemática y de la investigación realizada se llegó a la conclusión de construir un exoesqueleto que permite ser manipulado por un terapeuta mediante una interfaz gráfica, lo suficientemente fuerte para realizar una terapia sin problemas, pero también que permita su fácil movilidad a lo largo de un hospital, orientado a la rehabilitación y tratamiento de la enfermedad mencionada.

3. METODOLOGÍA

Como se mencionó ya en la motivación, la problemática tratada en el proyecto está enfocada en el mejoramiento de condiciones laborales a las que se somete un terapeuta ocupacional o fisioterapeuta en un jornada de trabajo regular en el área de rehabilitación, más concretamente para el proyecto en cuestión, rehabilitación pasiva del miembro superior. Teniendo claridad de este aspecto, la estructuración del proyecto procede a establecer un estado del arte mediante una revisión bibliográfica de dispositivos existentes con los mismos propósitos desarrollados con anterioridad en periodos de tiempo recientes.

Entre los dispositivos encontrados de destacan:

- Soft-Actuated [3], exoesqueleto de siete grados de libertad, implementados con músculos neumáticos
- BLEEX [4] (Berkeley Lower Extremity Exoskeleton o Exoesqueleto para extremidades inferiores de Berkeley), que hace uso de una arquitectura de control en red (ExoNET) para controlar e interactuar con la red física sobre la que corren los algoritmos de control.
- ASSIST [5] (Active Support Splint o Férula de Soporte Activo) exoesqueleto de un grado de libertad que funciona con actuadores neumáticos suaves.

Estos son tan solo algunos de los muchos dispositivos con funcionalidades y propósitos similares o relacionados, que en la etapa de formulación constituyeron una etapa importante en el planteamiento de la etapa de diseño, descrita más adelante. Ahora bien, partiendo de la asesoría profesional recibida de la terapeuta ocupacional Silvia Duarte, funcionaria del hospital universitario Nacional, y del MSc. ingeniero mecánico Luis Miguel Méndez, ambos docentes vinculados con la Universidad Nacional de Colombia, en conjunto con la investigación realizada se establecieron los objetivos específicos y requerimientos preliminares del proyecto, enunciados a continuación:

- Seguridad, teniendo presente el escenario y aplicación al que va dirigido, el dispositivo debe contar con altos niveles de seguridad, que garanticen precaución suficiente para cumplir con el objetivo de las terapias sin causar ningún tipo de lesión en el paciente.
- Portabilidad, su movilización debe ser sencilla, de manera tal que pueda ser rápida y fácilmente transportado de un lugar a otro, teniendo en cuenta que será utilizado dentro de un hospital y que el paciente podría o no desplazarse.
- Fácil manejo, hacer uso del dispositivo debe ser una tarea sin mayor dificultad, es decir, debe permitir al terapeuta total control de las rutinas desde una interfaz básica.

Con esto en mente, el trabajo de Protos UN se dividió en tres grandes áreas funcionales (mecánica, electrónica y HMI) cada una con un listado de requisitos a nivel ingenieril necesarios para el funcionamiento del dispositivo. El área mecánica estuvo a cargo del diseño estructural, los cálculos de fuerzas y velocidades relacionadas, la selección de materiales y el ensamblaje del dispositivo. Algunos de los principales métodos aplicados por este grupo incluyen la manufactura aditiva (impresión 3D), utilizada para la construcción de algunas de las partes del dispositivo tales como engranajes, soportes, bases para motores y demás piezas de unión entre segmentos, así como algunos procesos de manufactura de corte láser, taladrado y fresado, necesarios para el maquinado de algunas piezas.
Por su parte, el área electrónica se ocupó del control del dispositivo mediante la selección de actuadores, elementos de potencia y alimentación y el diseño de PCBs y finalmente, el grupo de HMI (Human Machine Interface) seleccionó el software de desarrollo, diseñó la interfaz gráfica, programó las rutinas de control y realizó la comunicación entre la interfaz y los circuitos de control.

4. RESULTADOS

El prototipo actual del ExPro se desarrolló en 1 año, para la fecha representa un sistema capaz de rehabilitar tres grados de libertad del miembro superior, capaz de simular los movimientos de pronación y supinación del codo, flexo-extensión de la muñeca y desviación ulnar-radial de la muñeca. Mediante tres servomotores se ejecutan movimientos necesarios para el proceso de rehabilitación muscular. El dispositivo permite seleccionar y definir la terapia (seleccionando los límites angulares de cada uno de los seis movimientos) mediante una aplicación por computador que envía la información al dispositivo de control principal: una Raspberry Pi3. La Raspberry traduce dicha información en comandos para accionar los servomotores y así generar los movimientos determinados. El dispositivo funciona desde tres grandes partes. A nivel electrónico, se desarrolló una PCB, encargada de alimentar la raspberry Pi y los distintos componentes electrónicos además de encargarse del control que consiste en comunicar la HMI con los actuadores siguiendo las órdenes de los usuarios. A nivel mecánico, el primer paso realizado fue la

definición de las velocidades y torques para cada uno de los motores. Por tanto, el dispositivo está programado para trabajar a una velocidad constante, determinada previamente mediante la realización de pruebas. Por otra parte, el dispositivo está diseñado para soportar el peso y ser capaz de mover el brazo de una persona de 100 kg. Como se dijo anteriormente, el exoesqueleto consta de tres grados de libertad, partiendo de esto, realiza movimiento terapéutico como más adelante se describe.

4.1 Grados de libertad.

4.1.1. Grado de libertad 1: Desviación ulnar-radial de Muñeca

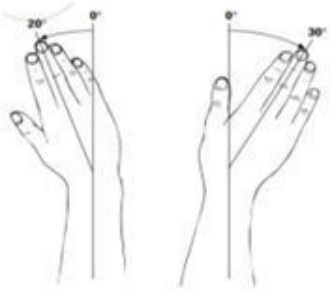


Ilustración 1: Desviación Ulnar-Radial



Ilustración 2: Rotación de servomotor 1

Este movimiento se genera desde el primer servo-motor como se observa en la ilustración 2.

4.1.2. Grado de libertad 2: Flexo-Extensión Muñeca

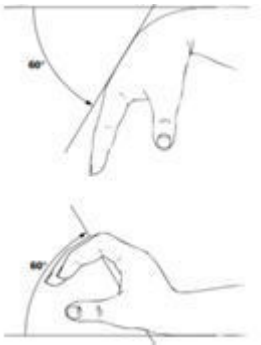


Ilustración 3: Flexo-extensión

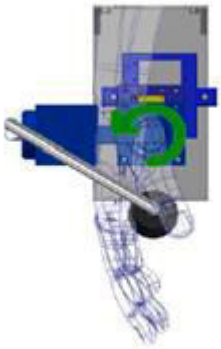


Ilustración 4: Rotación servomotor 2

A partir de un servomotor 2 (Ilustración 4) se genera un movimiento rotacional que debe comprender un rango de 120°. Por medio de la pieza soporte el movimiento se transmite al mando y este a su vez a la mano, con lo que se obtiene un movimiento de flexo-extensión.

4.1.3. Grado de libertad 3: Prono-supinación antebrazo

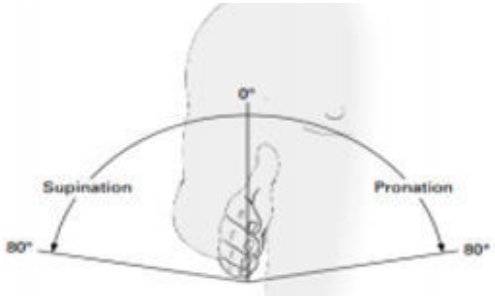


Ilustración 5: Prono-supinación



Ilustración 6: Rotación Servomotor 3

A partir de un servomotor 3 se genera un movimiento rotacional que debe comprender un rango de 160° (Ilustración 5). El piñón montado en el servomotor transmite la potencia al engrane, sobre este engrane se encuentra montada toda la estructura que lleva hasta la muñeca. Por tal razón, al mover el engrane, toda la estructura de la muñeca se mueve produciendo el movimiento de prono-supinación.

4.2. Cálculos:

4.2.1. Engranaje (Corona + Piñon) metodología AGMA

En primera instancia se definió la relación de transmisión de 2, y el módulo a implementar m=4, estos valores se decidieron debido a que la fabricación se realizaría por fabricación aditiva (Impresión 3D), y un ángulo de presión 20°. Teniendo esto definido, y los torque y velocidades de trabajo, se definió la geometría del piñón y la corona.

Tabla 1: Geometría piñón-corona

ENGRANAJE RECTO.	Piñón	Engrane
N [Numero de dientes]	**18**	**36**
X [Relación de velocidad]	1	2
Angulo de presión normal (°)	20	20
Pn Paso diametral (dientes /mm)	0,25	0,25
d Diámetro de paso (mm)	**72**	**144**
Espesor del diente "t" [mm]	6,3	6,3
F ancho de cara	**17,59**	

4.2.2. Esfuerzo a flexión AGMA

Los cálculos relacionados con los esfuerzos a flexión en el engrane se realizaron siguiendo la metodología AGMA. De acuerdo con las tablas preestablecidas para Nylon, se calculó tanto el esfuerzo soportable por el engrane como el esfuerzo permisible, agregando un factor de corrección de material impreso en caso de que se trabajara otro material con diferentes propiedades mecánicas. Por último, se determinaron los factores de seguridad necesarios para la flexión

Tabla 2: Esfuerzos a flexión de engranajes rectos

Resistencia a la flexión material [Mpa]	48
Esf. Adm. Flexionante (kgf/mm^2)	1,5
Esf. Adm. Flexionante (MPa)	**14,7105**
Factor de corrección por material e impresión	0,8
Esf. Adm. Flexionante Material (MPa)	11,7684
N de ciclos piñón	100000
Esfuerzo Admisible Corregido(Mpa)	25

Tabla 3: Esfuerzo a picadura de engranaje recto

Factor_Seguridad_Flexión	**6,29 (piñón)**	**6,98 (engrane)**
Esfuerzo Admisible Contacto(MPa)		24,5175
No de ciclos Piñón		100000
Esfuerzo Admisible Corregido(Mpa)		**30,481**
Factor_Seguridad_Picadura		**1,5**

4.2.2. Corona

Los esfuerzo y deformaciones sobre las piezas más críticas del dispositivo fueron analizados con ayuda de la herramienta de análisis por elementos finitos del software Inventor ®. Los primeros en evaluar fueron el engrane principal y el piñón de la sección pronosupinación. Para el caso del engrane, se observó que los mayores esfuerzos se presentan en la raíz de diente, no obstante, el esfuerzo máximo no superó el esfuerzo admisible del material (28 MPa para PLA impreso).

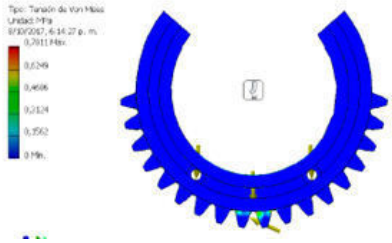


Ilustración 7: Distribución de esfuerzos - Engrane principal

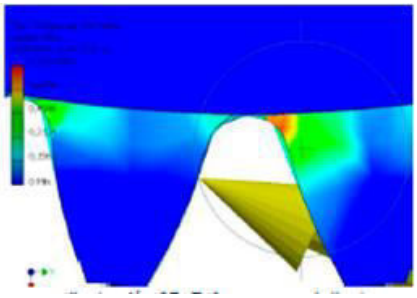


Ilustración 8: Esfuerzos en el diente

Desplazamientos y deformaciones de engrane

Adicionalmente, el análisis de desplazamientos evidenció que la punta del diente del engrane fue la más afectada, sin embargo, el desplazamiento máximo de la pieza mediante simulación arrojó un valor de 0,1069 mm que permite considerar como despreciable la deformación del diente.

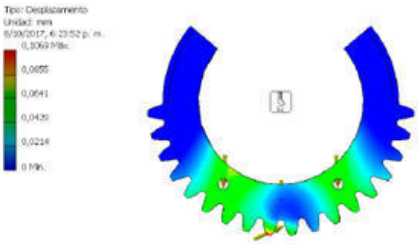


Ilustración 9: Desplazamientos y deformaciones

4.2.3 Piñón

Por su parte, el piñón de la sección pronosupinación presentó mayores esfuerzos cerca al agujero del eje, esto debido a los demás agujeros que permiten el acople el motor y que actúan como concentradores de esfuerzos (Ilustración 10). No obstante, cuando se compara el esfuerzo máximo arrojado por la simulación (1,6 MPa) con el esfuerzo admisible del material (28 MPa) es evidente que se encuentra muy por debajo y por ende es despreciable. De manera similar, cuando se analizan los desplazamientos, el diente del piñón presenta la mayor deformación con valores de 0,6898 mm (Ilustración 11).

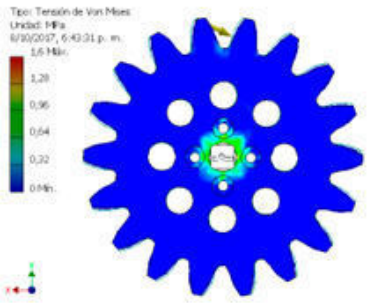


Ilustración 10: Esfuerzos en el piñón

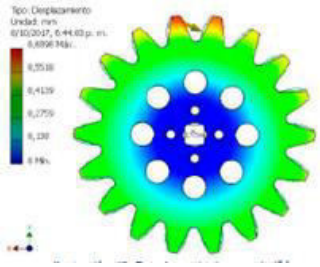


Ilustración 11: Desplazamientos en el piñón

4.2.3. *Cálculos asociados a la muñeca*

Aquellas piezas con mayor sección en voladizo también fueron sometidas a un análisis por elementos finitos de modo que se simularán cargas en puntos críticos y se obtuvieron tanto los esfuerzos como los desplazamientos máximos.

Soporte en voladizo

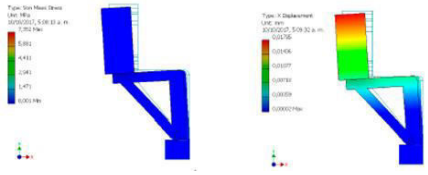


Ilustración 12: Soporte en voladizo.

Tal como se evidencia en la ilustración 12, el esfuerzo máximo obtenido fue de 7.352 MPa, un valor bastante inferior al esfuerzo admisible del material y el desplazamiento máximo fue de 0,018 mm aproximadamente, que en comparación con las medidas del mecanismo es igualmente despreciable.

4.2.4. Soporte Mando

Por otra parte, la pieza denominada Soporte Mando arrojó un esfuerzo máximo de 0.727 MPa y un desplazamiento máximo de 1 mm aproximadamente, ambos valores permitidos dentro de los requerimientos funcionales.

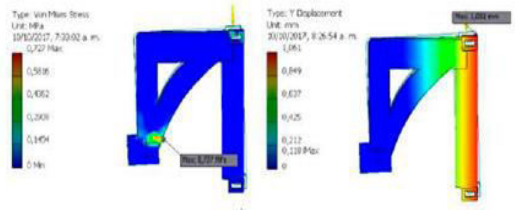


Ilustración 13: Soporte mando

4.2.4. Soporte de Rodamiento

La pieza a continuación es utilizada en dos posiciones diferentes durante el funcionamiento del dispositivo, por tanto, fue necesario su análisis en ambos sentidos con sus respectivas restricciones:

Disposición 1:

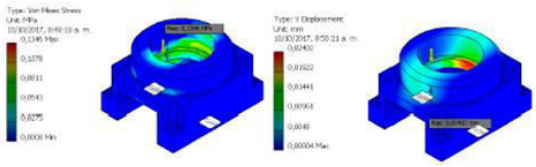


Ilustración 14: Soporte rodamiento - Disposición 1

El esfuerzo máximo obtenido fue de 0.135 MPa, nuevamente por debajo del esfuerzo permisible del material, y un desplazamiento máximo de 0,024 mm aproximadamente que no genera alteraciones.

Disposición 2:

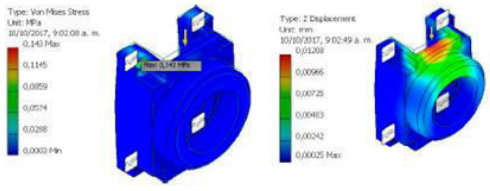


Ilustración 15: Soporte rodamiento - Disposición 2

En esta posición el esfuerzo máximo arrojado fue de 0.143 MPa y el desplazamiento máximo fue de 0.012 mm aproximadamente, como ya se intuye, esos valores una vez más no interfieren con el diseño de las piezas.

La ilustración 16 muestra la primera versión del dispositivo terminado.

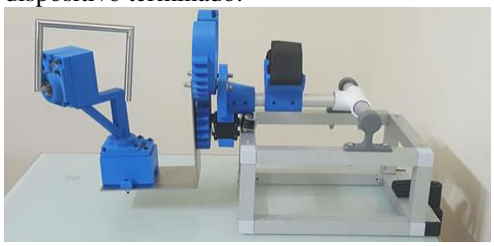


Ilustración 16: ExPro a nivel mecánico.

5. DISCUSIÓN

Gracias a los avances ya evidenciados se estima en un futuro cercano seguir haciendo modificaciones y adecuaciones al prototipo con el objetivo final de generar un aporte fuera de la teoría e idealización tanto a desarrollo de la tecnología en Colombia como a las problemáticas abordadas, salud tanto de terapeutas como en la de los pacientes tratados. Dentro de las mejoras proyectadas se estima la implementación de un cuarto grado de libertad, cambios en la praxis para generar un nuevo prototipo con mejor relación de fuerza y peso. Además de esto se espera poder implementar ayudas de software, partiendo por el mejoramiento de la interfaz gráfica ya diseñada, haciéndola más amigable con el usuario, en conjunto a ella se espera adecuar una base de datos que permita almacenar información de los pacientes en cuestión para hacer análisis de su progreso a lo largo de los tratamientos establecidos. Así mismo se espera adecuar el prototipo a especificaciones de equipos médicos en pro de una pronta implementación en escenarios reales.

5. CONCLUSIONES

Basados en las experiencias recopiladas por los fisioterapeutas del hospital universitario nacional de Colombia, se determina que la rehabilitación asistida por el ExPro será significativo para aumentar la eficiencia y así optimizar el proceso

terapéutico, puesto que su diseño está pensado con el objetivo de ser una herramienta de apoyo, al reducir el esfuerzo físico empleado. Además el uso del software les permitirá controlar la terapia de forma simplificada y de esta forma llevar una mejor inspección de los progresos de los pacientes de esta forma se pueden atender mayor cantidad de personas y esto reducirá el costo y de esta forma más gente reciba el servicio a un menor costo.

RECONOCIMIENTO

El proyecto en cuestión ha sido desarrollado por un grupo de cerca de 20 estudiantes de pregrado de la universidad nacional de Colombia, pertenecientes al semillero de investigación Protos UN, avalados por el ingeniero Luis Miguel Mendez Moreno y apoyados por la dirección de bienestar universitario desde el Programa de Gestión de Proyectos, todos ellos involucrados en el proyecto desde su inicio en el segundo semestre académico del año 2017, lo que los hace merecedores de reconocimiento es esta sección pues sin su trabajo y compromiso no sería posible contar con un desarrollo tangible de este proyecto. De manera especial se hace mención de Jessica Zuleima Parrado Agudelo, Javier Fernando Garnica Molina, Juan Nicolas Bustos Ramirez y Cristián Mauricio Casallas Contreras por ser los fundadores y principales desarrolladores de esta idea finalmente materializada, también hacer una mención especial a la terapeuta Silvia Duarte por su cooperación al momento de concebir la idea inicial del proyecto y sus constantes recomendaciones al respecto.

REFERENCIAS

[1] World Health Organization, «International Classification of Impairments, Disabilities and Handicaps, » Weekly Epidemiological Record 68, 1993.

[2] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), «Información estadística de la discapacidad,» 2003.

[3] B. Sheng, «Bilateral robots for upper-limb stroke rehabilitation: State of the art and future prospects., » Medical engineering & physics, vol. 38, nº 7, pp. 587-606, 2016.

[4] Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons, CSIC, Madrid, Spain: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

[5] B. J. K. a. H. I. K. Gert Kwakkel,«Effects of robot assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review» Neurorehabilitation and neural repair, vol. 22, nº 2, pp. 111-121,2018

BANCO DE PRUEBAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA FRICCIÓN EN TRANSMISIONES TIPO POLEA-CABLE

TEST BENCH FOR THE EVALUATION OF THE FRICTION IN PULLEY-CABLE TRANSMISSIONS

MSc. Giovanni Torres Charry*, MSc. Alejandro Salazar Vélez, MSc. Bernardo Andres Cardona Noreña**, PhD. Juan Bernardo Gómez Mendoza**,**

***Universidad Nacional de Colombia- sede Manizales,** Facultad de ingeniería y arquitectura, Grupo de Investigación SHAC.
Carrera 27 64-60, Manizales, Caldas, Colombia. (+57 68) 879300
***Universidad Tecnológica de Pereira,** Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación Procesos de Manufactura y Diseño de Máquinas.
Carrera 27 #10-02 Barrio Álamos, Pereira, Risaralda, Colombia (+57 6) 3137300
E-mail: gitorresch@unal.edu.co , gtorres@utp.edu.co
** **Universidad Nacional de Colombia- sede Manizales,** Facultad de ingeniería y arquitectura, Grupo de Investigación SHAC.
Carrera 27 64-60, Manizales, Caldas, Colombia. (+57 68) 879300
E-mail: alsalazarve@unal.edu.co , bacardonan@unal.edu.co , jbgomezm@unal.edu.co

Resumen: En el modelado dinámico de robots manipuladores, la identificación de la fricción es una de las tareas más complejas y puede requerir una amplia gama de análisis dinámicos experimentales. Si bien muchos investigadores han trabajado en la identificación de la fricción y se han propuesto diversas configuraciones para investigar sus características, la gran mayoría de los modelos propuestos consideran en su formulación únicamente la velocidad relativa entre las superficies que interactúan, sin considerar explícitamente el efecto del tipo de transmisión, la temperatura o la carga. Por sus características, las transmisiones tipo polea-cable están siendo consideradas como una buena alternativa para ser utilizadas en robots que interactúen con humanos. Aquí se propone un banco de pruebas que presenta simplicidad, flexibilidad y buena versatilidad, para evaluar el comportamiento de la fricción en trasmisiones tipo polea-cable de mediana-baja potencia. El banco de pruebas está conformado por seis módulos: fuente de potencia, transmisión, eslabón, módulo de mando, módulo de medición y módulo de adquisición de datos; el banco de pruebas permite manipular variables como la carga externa, la velocidad y la tensión en el cable. En este trabajo se presenta el banco de pruebas, el procedimiento de configuración general y los resultados experimentales obtenidos durante su validación.

Palabras clave: Fricción, Robots Manipuladores, Banco de Pruebas, Transmisión tipo polea-cable.

Abstract: In the dynamic modeling of robot manipulators, the identification of friction is one of the most complex tasks and may require a wide range of experimental dynamic analyzes. Although many researchers have worked on the identification of friction and many configurations have been proposed to investigate its characteristics, most of the proposed models consider in their formulation only the relative speed between the surfaces

that interact, without explicitly considering the effect of the type of transmission, temperature or load. Due to their characteristics, pulley-cable transmissions are being considered as a good alternative to be used in robots that interact with humans; here we propose a test bench that presents simplicity, flexibility and good versatility, to evaluate the behavior of friction in medium-low power pulley-cable transmissions. The test bench is made up of six modules: power source, transmission, link, control module, measurement module and data acquisition module; The test bench allow to manipulate variables such as external load, speed and tension in the cable. In this work we present the test bench, the general set up procedure and the experimental results obtained during its validation.

Keywords: Friction, robot manipulators, test bench, pulley-cable transmissions.

1 INTRODUCCIÓN

La backdrivability de lazo abierto en un manipulador puede ser definida como la capacidad que se tiene de reproducir de manera precisa en las entradas del manipulador (los motores), las fuerzas aplicadas en el efector final de salida (Rooks, 2006; Townsend & Guertin, 1999); es esta característica la que hace que las transmisiones tipo polea-cable sean menos peligrosas en caso de colisión, razón por la cual ha habido una tendencia en los últimos años a ser utilizadas en dispositivos y robots que deben interactuar físicamente con los humanos (pHRI), en menoscabo de las transmisiones tradicionales de engranajes, que se caracterizan por tener baja backdrivability, y que además exhiben problemas de juego y fricción.

Para poder controlar los movimientos del robot, se necesitan modelos dinámicos precisos, en los cuales la fricción es uno de los términos más complejos, debido principalmente a su dependencia de varios factores que provocan que su comportamiento varíe entre los diferentes rangos de operación del robot. Existen diferentes trabajos sobre el modelado y la identificación experimental del fenómeno de la fricción, algunos de los cuales, y sus modificaciones, han sido utilizados en el modelado de la fricción en robots manipuladores (Armstrong-Hélouvry, Dupont, & De Wit, 1994; Boegli, De Laet, De Schutter, & Swevers, 2012; Geffen, 2009; Kermani, Patel, & Moallem, 2007; Lampaert, Swevers, & Al-bender, 2002; Li & Taghiradt, 2015; Olsson, Åström, Canudas de Wit, Gäfvert, & Lischinsky, 1998; Rizos & Fassois, 2005); sin embargo la mayoría de estos modelos involucran en su formulación, de los parámetros medibles, únicamente a la velocidad relativa entre las superficies en contacto; son pocos los trabajos de modelado de la fricción que incluyen otros factores como la temperatura y la carga (André Carvalho Bittencourt & Gunnarsson, 2012; André Carvalho Bittencourt, Wernholt, Sander-Tavallaey, & Brogårdh, 2010; Hamon, Janot, & Haption, 2010).

En cuanto a los bancos experimentales utilizados en el desarrollo de los modelos de fricción, éstos no se asemejan, en su configuración física, a las transmisiones comúnmente utilizadas en los robots manipuladores y mucho menos a las transmisiones tipo polea-cable, recientemente utilizadas en algunos robots manipuladores.

Para determinar el comportamiento de la fricción en las transmisiones tipo polea-cable, y su variación al manipular algunos parámetros como la carga externa, la velocidad, la relación de transmisión y la tensión en el cable, se diseñó y construyó un banco de pruebas que representa físicamente una transmisión polea-cable semejante a las que se utilizan actualmente en algunos robots manipuladores comerciales.

En este trabajo se describe la estructura y configuración del banco de pruebas construido; se profundiza en algunos aspectos que fueron claves o presentaron inconvenientes en la fase de diseño o de implementación. Al final se presentan y se comentan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en la validación del banco de pruebas

2 CONFIGURACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

El banco de pruebas está conformado en su parte central por una transmisión tipo polea-cable de una sola etapa. Diseñado y construido para efectuar experimentos que posibiliten valorar el comportamiento de la fricción, el banco de pruebas permite realizar variaciones en parámetros operativos como la velocidad de rotación, la carga externa, el tamaño de las poleas y la tensión en el cable.

Como se muestra en la *Figura 1*, el banco está configurado por seis módulos: fuente de potencia, transmisión, eslabón, módulo de mando, módulo de medición y módulo de adquisición de datos.

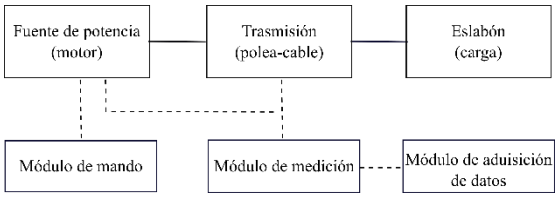


Figura 1. Esquema general de la configuración del banco de pruebas

En la *Figura 2* se puede observar el banco de pruebas durante su fase de validación preliminar.

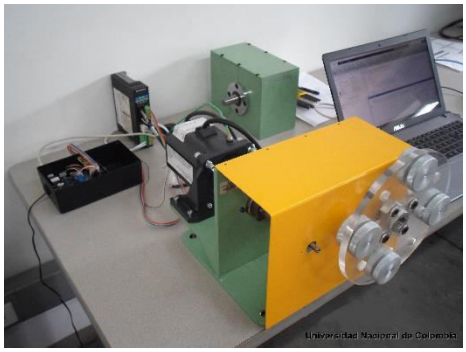


Figura 2. Banco de pruebas.

2.1 Capacidades del banco de pruebas

El diseño del banco de pruebas procura reproducir las condiciones de operación que se pueden encontrar en la primera articulación de un robot manipulador comercial, de baja capacidad de carga (low payload), para lo cual se identificaron una serie de condiciones de operación en términos de desplazamiento, velocidad y carga (torques); las capacidades del banco de prueba se resumen en la tabla 1:

Tabla 1: Capacidades del banco de prueba

Parámetro	Valor
Potencia del motor	400 W (1/2 hp)
Torque nominal del motor	1,30 N.m
Torque máximo del motor	2,60 N.m
Rango de velocidad del motor	2 ~ 4000 r/min (2000:1), con ajuste digital 30 ~ 4000 r/min (133:1), con ajuste análogo
Carga máxima en el eje de salida de la transmisión	5,8 N.m (para tiempo de aceleración de 0,1 s)
Rango de operación de la transmisión	13 vueltas en cada sentido (en el eje motor)
Relaciones de transmisión disponibles	2:1; 3:1; 4:1, 5:1

2.1 Descripción del diseño mecánico

En la *Figura 3* se puede ver el prototipo virtual del componente mecánico del banco de pruebas, este está configurado por los módulos de fuente de potencia, el módulo de transmisión y el módulo de eslabón.

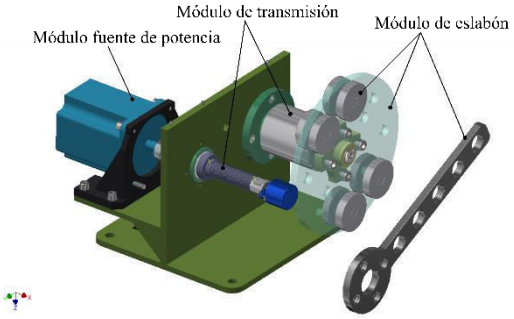


Figura 3. Componente mecánico del banco de pruebas

2.1.1 Módulo de fuente de potencia

El módulo de fuente potencia está compuesto por un motor sin escobillas y su controlador. El motor es un BLDC (motor DC sin escobillas), que se puede alimentar monofásicamente o trifásicamente con 200 - 240 VAC, tiene una potencia de 400 W (1/2 hp) y al cual, mediante ajuste digital, se le puede variar la velocidad entre 2 y 4000 rpm. El torque instantáneo máximo admisible en el motor es de 2,6 N.m y el torque máximo para operación continua hasta una velocidad de 3000 rpm, es de 1,3 N.m.

Su selección se realizó tomando como referencia las condiciones típicas de operación de la primera articulación de un robot manipulador de baja capacidad de carga, y que además tuviera la capacidad de girar a bajas velocidades con torques relativamente altos, sin necesidad de utilizar un reductor de velocidades mecánico.

2.1.2 Módulo de transmisión

El módulo de transmisión consta de reductor tipo polea-cable, el cual está configurado por dos sistemas, así: a) sistema de polea, el cual se acopla a la carga externa y b) sistema eje motor, que se acopla con el motor, estos dos sistemas se conectan mediante un cable de acero.

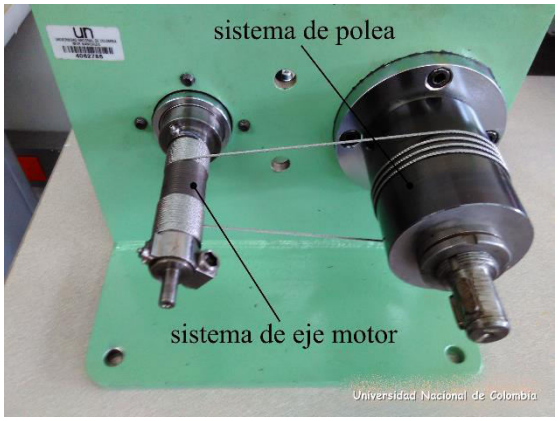


Figura 4. Módulo de transmisión

El sistema de eje motor (*Figura 4*) consiste en un eje, sobre cuya superficie se ha labrado una rosca redonda, que sirve como guía para el enrolle del cable de la transmisión. En el extremo del eje se tiene un subsistema que permite darle la tensión requerida al cable.
El sistema de polea (*Figura 4*) consiste en un eje al que se le ha acoplado un tambor, este recibe la potencia del eje motor a través del cable, realiza la reducción de la velocidad y transfiere la potencia (torque y velocidad) a la carga externa. El tambor es desmontable, lo que permite acoplar tambores de diámetros diferentes para cambiar la relación de transmisión; en su configuración básica la máquina cuenta con dos tambores y dos ejes motor, logrando así tener hasta cuatro relaciones de trasmisión (2:1, 3:1, 4:1, 5:1).

El cable utilizado para la transmisión del movimiento entre el eje-motor y la polea, es de acero inoxidable AISI 304 de 1/16" (1,55 mm aprox.) de 7x7. Existe un cable para cada una de las combinaciones posible de eje-motor y polea.

2.1.3 Módulo de eslabón

El módulo eslabón es el encargado de suministrar la carga externa al sistema. Para la simulación de la carga externa (carga y torque), es posible utilizar un disco o un eslabón perforados; sobre cuyas perforaciones se ensamblan parejas de masas.
La variación de la carga se logra utilizando varios conjuntos de masas y el disco perforado; el disco tiene 12 perforaciones distribuidas en dos circunferencias, como el que se muestra en la *Figura 5*. En cada perforación del disco se puede ubicar una pareja de masas que tiene un peso de 5 N (correspondiente a una masa de 0,51 kg), la distribución de las masas en el disco permite tener varias configuraciones de carga y de torque externo.

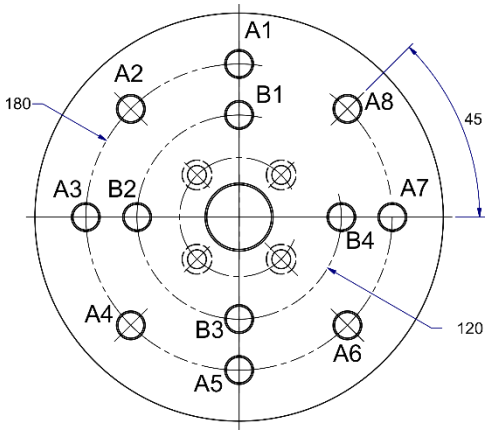


Figura 5. Disco posicionador de las cargas en el banco de pruebas

Disponiendo de las suficientes cargas externas, el número de combinaciones posibles de carga es bastante grande; tan solo utilizando dos conjuntos de masas y poniéndolas a la vez, es decir dos perforaciones ocupadas en el disco, se obtendrían 33 esquemas de carga diferentes.

2.2 Descripción del módulo de mando

El controlador suministrado con el motor es la parte central del módulo de mando; este permite cambiar

los parámetros de funcionamiento del motor, en dos ámbitos de control: posición y velocidad; las señales de mando para el controlador pueden ser del tipo digital o análogas.

A pesar de que el ajuste de la velocidad de operación y del desplazamiento puede realizarse directamente en el controlador, utilizando su interfaz, o mediante el software MEXE02, suministrado por los proveedores; en cualquiera de los dos casos, solo se pueden establecer hasta 16 conjuntos de datos de operación, que pueden configurar perfiles continuos de velocidad tipo escalón. Para tener la posibilidad de utilizar perfiles de velocidad diferentes a los de tipo escalón, se amplió el módulo de mando inicial mediante el desarrollo e implementación de un sistema de mando complementario.

El sistema complementario de mando se compone de una aplicación desarrollada en Matlab (ControlG, *Figura 6*), y un programa en Arduino corriendo en una tarjeta Intel Galileo Gen 2 (*Figura 7*); además de permitir el uso de la configuración de fábrica, este complemento posibilita la realización de perfiles de velocidad diversos, siempre y cuando estos puedan ser graficados en Matlab.

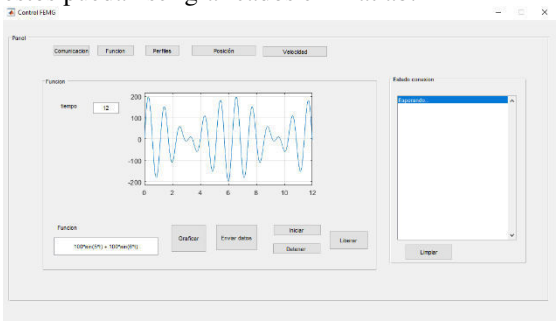


Figura 6. Aplicación ControlG

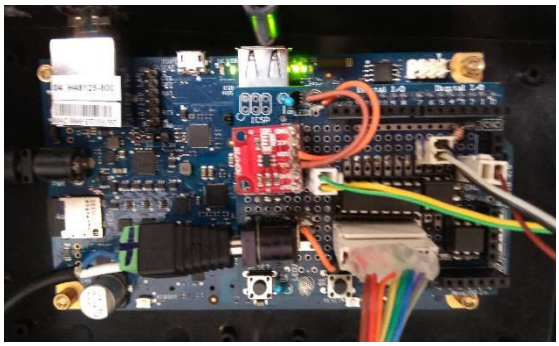


Figura 7. Tarjeta del sistema de mando complementario

2.3 Descripción del módulo de medición

El módulo de medición está configurado por los siguientes sistemas:

2.3.1 Sistema de medición de velocidad

El sistema de medición de velocidad está conformado por dos encoder incrementales. El primer encoder está ubicado en el eje motor y se utiliza para medir la velocidad de entrada a la transmisión. El segundo encoder está ubicado en el eje de salida de la transmisión, y es utilizado para medir la velocidad resultante; conociendo la relación de transmisión, estas dos medidas de la velocidad permiten determinar si existe deslizamiento o juego en la transmisión.

2.3.2 Sistema de medición de voltajes y corrientes.

El valor de la fricción en la transmisión es determinado al comparar el torque requerido para mover el motor en vacío y el torque requerido para mover la transmisión y la carga. El torque se calcula a partir de las mediciones de los voltajes y las corrientes en el motor; estas señales deben ser tomadas simultáneamente, para su medición se diseñó y construyó un sistema de medición de voltajes y corrientes, para ser instalado entre el sistema de control y el motor.

El sistema de medición de voltajes y corrientes consta de tres tarjetas (una por fase, *Figura 8*). Cada una de las tarjetas está conformada por una etapa de potencia y una etapa instrumental; la etapa de potencia permite ser adecuada para diferentes corrientes o voltajes, mientras que la etapa instrumental permite la medición de cuatro canales de las señales acondicionadas.

Debido a las características de funcionamiento del sistema de control, se hace necesario que la etapa de medición de potencia tenga la capacidad de tomar las muestras suficientes, de tal manera que se capturen todas las conmutaciones del controlador; la frecuencia máxima de conmutación que entrega el controlador del motor utilizado es de 500 kHz por lo que el módulo implementado se diseñó con una capacidad de muestreo de 2 MHz, suficientes para la toma de datos.

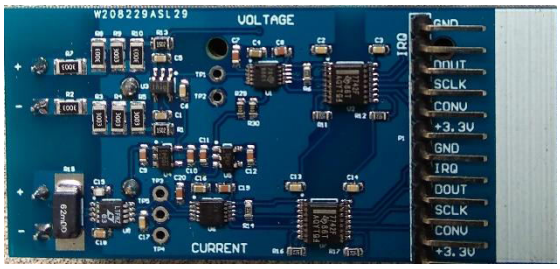


Figura 8. Tarjeta del sistema de medición de voltajes y corrientes

Con el objetivo de reducir el ruido y adaptar la medición de corriente, las tarjetas de medición se han conectado a tierras flotantes en cada fase utilizando resistores Shunt de baja potencia. La importancia de usar estos resistores a diferencia de otros módulos de corriente como son los de efecto Hall, radica en que con estos reduce el efecto de ruido electromagnético externo que el motor puede generar en su funcionamiento normal.

2.4 Descripción del módulo de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos fue implementado utilizando la tarjeta D10-Nano de Intel constituido principalmente por un chip FPGA y un ARM conocido como system on chip (SoC), el cual permite diseñar Hardware especifico y usar un sistema operativo Linux.

Implementar un SoC en el sistema de adquisición ofrece dos principales ventajas al compararlo con un microcontrolador; la primera de ellas es que la FPGA puede ser programada para ajustarse a varios módulos de medición y recibir las señales de forma paralela, donde cada medición es almacenada en la memoria RAM del microprocesador por medio de un bus DMA (Direct Memory Access), el DMA permite enviar información rápida al lado del microprocesador sin ser afectado por las interrupciones del sistema operativo.

La segunda ventaja es que se pueden ejecutar programas de adquisición y monitoreo de forma remota, utilizando la conexión a internet habilitada por el sistema operativo interno.

Además del hardware, el sistema de adquisición cuenta con una aplicación desarrollada en Matlab, que realiza un filtrado en las señales para eliminar el ruido, a la vez que adecua y da formato a los datos para facilitar su posterior manipulación.

3 MODELO DEL BANCO DE PRUEBAS

3.1 Modelo del motor

El motor BLDC es un motor síncrono de CA con imanes permanentes en el rotor (parte móvil) y bobinados en el estator (parte fija).

El modelado de un motor BLDC se puede desarrollar de manera similar al de un motor síncrono trifásico. El modelo de las bobinas de la armadura para el motor BLDC puede ser expresado de la siguiente manera (Cham & Samad, 2014; Mondal, Mitra, & Chattopadhyay, 2015; Shetty, Subramonium, & Kumar, 2015; Tibor, Fedak, & Ďurovský, 2011):

$$V_a = Ri_a + L\frac{di_a}{dt} + e_a \qquad (1)$$

$$V_b = Ri_b + L\frac{di_b}{dt} + e_b \qquad (2)$$

$$V_c = Ri_c + L\frac{di_c}{dt} + e_c \qquad (3)$$

Donde, L es la auto inductancia de la armadura $[H]$, R es la resistencia de la armadura $[\Omega]$, V_a, V_b, V_c son los voltajes en los terminales de las fases $[V]$, i_a, i_b, i_c, corriente de entrada al motor $[A]$, e_a, e_b, e_c son los voltajes back-EMF del motor $[V]$.

El torque total de salida del motor puede ser representado como la suma del torque de cada fase:

$$T_m = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w} \qquad (4)$$

Donde w es la velocidad del rotor [rad.s^{-1}]

3.2 Modelo del banco de pruebas

La ecuación de balance de torques para el banco de pruebas, utilizando una trasmisión ideal (sin fricción, sin backlash, sin elasticidad) con una relación de transmisión R, como el mostrado en la *Figura 9*, puede ser escrita de la siguiente manera: (Craig & Engineering, 2017)

$$T_M R - T_L - T_F = [(J_M + J_1)R^2 + (J_2 + J_L)]\ddot{\theta}_L + (R^2 B_M + B_L)\dot{\theta}_L \quad (5)$$

Donde T_M es el torque del motor, T_L es el torque de la carga, J_M la inercia del motor, J_L la inercia de la carga, B_M el amortiguamiento del motor, B_L el amortiguamiento de la carga y $\dot{\theta}_L$ la velocidad angular de la carga.

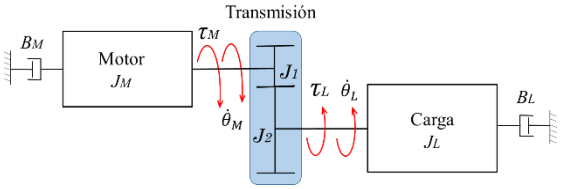


Figura 9. Esquema del banco de pruebas con una transmisión ideal.

En el banco de pruebas, la energía es disipada principalmente por tres componentes de fricción: a) la fricción en los rodamientos del motor, b) la fricción en el lado de la carga y c) la fricción en la transmisión; aunque se anticipa que la fricción en la transmisión es dominante en una configuración libre de carga, se cree también que la fricción en el lado de la carga puede hacerse más significativa cuando la inercia del lado de la carga se incrementa (Chen, Kong, & Tomizuka, 2015). En la ecuación 5 los tres componentes de la fricción han sido incluidos en un solo factor. Una primera aproximación a la determinación de la fricción en el sistema es modelar toda la fricción como ésta es percibida desde el lado del motor

$$\left[J_M + J_1 + J_2\left(\frac{1}{R}\right)^2\right]\ddot{\theta}_M + \left(\frac{1}{R}\right)\left(T_L + J_L\ddot{\theta}_L\right) + T_F = T_M \qquad (6)$$

La mayoría de los modelos de fricción incluyen en su formulación el efecto de la viscosidad (amortiguamiento), en la ecuación 5 este efecto ha sido considerado externo a la componente de la fricción. Por otro lado, en la ecuación 6 se ha incluido el efecto viscoso en la componente de la fricción.

4 PRUEBAS DE VALIDACIÓN PRELIMINARES

El equipo de pruebas se encuentra en su etapa de validación. Inicialmente se han planeado y ejecutado pruebas para validar los módulos de medición y adquisición de datos; de manera simultánea se caracteriza el motor. fricción.

Para la caracterización del motor con miras a la identificación de la fricción, se han efectuado pruebas con carga y sin carga; el objetivo es poder utilizar esta información para incorporar el efecto de la carga en el comportamiento de la fricción.

En la *Figura 10* se presentan las señales de voltaje y corriente medidas para el motor en vació, girando a 3000 rpm.

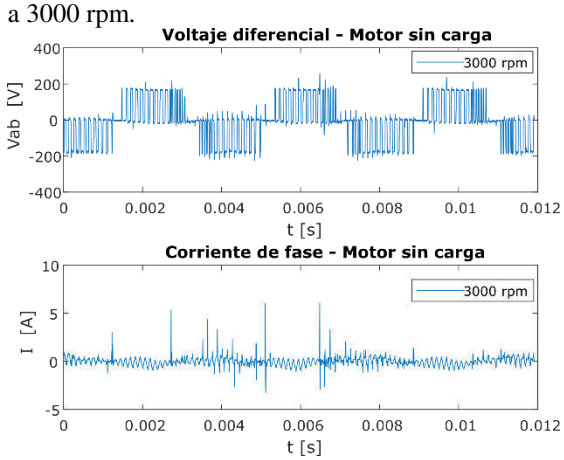


Figura 10. Voltaje y corriente para el motor sin carga.

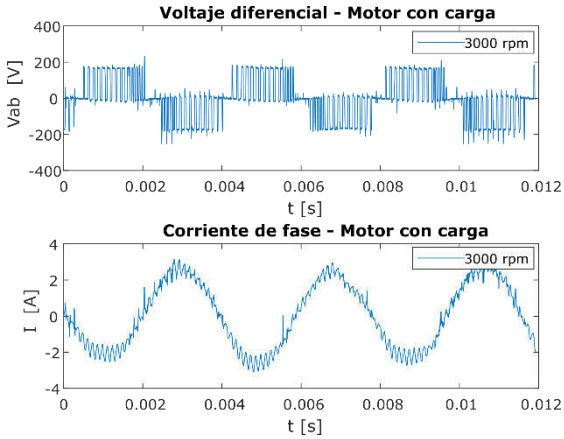


Figura 11. Voltaje y corriente para el motor con carga.

En la *Figura 11* se pueden ver las señales de voltaje y corriente, medidas con el motor acoplado a un reductor de engranajes, con cargas externas (*Figura 12*) y girando a 3000 rpm.

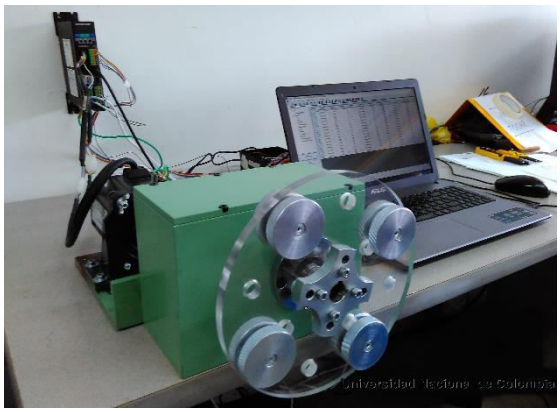


Figura 12. Pruebas para la caracterización del motor.

5 TRABAJO FUTURO

Se plantea implementar en el equipo, un sistema que permita calentar y medir la temperatura en la polea y el eje motor de la transmisión polea-cable, con lo que se podría analizar el efecto de la temperatura en el comportamiento de la fricción.

6 CONCLUSIONES

Aunque el equipo de pruebas se encuentra en su etapa de validación, los resultados preliminares permiten concluir que este es adecuado para identificar el comportamiento de la fricción en la transmisión.

Es claro que las señales adquiridas requieren un trabajo de preprocesamiento (filtrado), previo a ser utilizados en la cuantificación de los torques.

Por otro lado, se ha podido visualizar que el comportamiento de las señales de voltaje y corriente del motor dista del comportamiento ideal reportado en la teoría para los motores BLDC, en donde se muestran comportamientos suaves con perfiles trapezoidales para los voltajes y perfiles escalón (DC) para la corriente. Esto se debe principalmente al efecto del sistema de control sobre el torque y la velocidad, que el controlador ejerce sobre el motor del equipo de pruebas.

REFERENCIAS

Armstrong-Hélouvry, B., Dupont, P., & De Wit, C. C. (1994). A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. *Automatica*, *30*(7), 1083–1138. https://doi.org/10.1016/0005-1098(94)90209-7

Bittencourt, A. C., & Gunnarsson, S. (2012). Static Friction in a Robot Joint—Modeling and Identification of Load and Temperature Effects. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, *134*(5), 051013. https://doi.org/10.1115/1.4006589

Bittencourt, A. C., Wernholt, E., Sander-Tavallaey, S., & Brogårdh, T. (2010). An extended friction model to capture load and temperature effects in robot joints. *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, 6161–6167. https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650358

Boegli, M., De Laet, T., De Schutter, J., & Swevers, J. (2012). A smoothed GMS friction model for Moving Horizon friction state and parameter estimation. *International Workshop on Advanced Motion Control, AMC*, 1–6. https://doi.org/10.1109/AMC.2012.6197042

Cham, C.-L., & Samad, Z. Bin. (2014). Brushless DC Motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Current Sensing. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, *9*(3), 866–872. https://doi.org/10.5370/JEET.2014.9.?.742

Chen, W., Kong, K., & Tomizuka, M. (2015). Dual-Stage Adaptive Friction Compensation for Precise Load Side Position Tracking of Indirect Drive Mechanisms, *23*(1), 164–175.

Craig, K., & Engineering, M. (2017). Inertia Mismatch : Fact or Fiction ? Retrieved August 28, 2018, from http://www.multimechatronics.com/wp-content/uploads/2017/04/Inertia-Mismatch-Fact-or-Fiction.pdf

Geffen, V. Van. (2009). A study of friction models and friction Compensation. *A Study of Friction Models and Friction Compensation*, 1–24. Retrieved from http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/11194.pdf

Hamon, P., Janot, a, & Haption, S. a. (2010). Dynamic Identification of Robot with a Load- Dependent Joint Friction Model. *International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 129–135.

Kermani, M. R., Patel, R. V., & Moallem, M.

(2007). Friction identification and compensation in robotic manipulators. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *56*(6), 2346–2353. https://doi.org/10.1109/TIM.2007.907957

Lampaert, V., Swevers, J., & Al-bender, F. (2002). Modification of the Leuven Integrated Friction Model Structure, *47*(4), 683–687.

Li, G. J., & Taghiradt, et al. (2015). Theoretical modelling and experimental identification of nonlinear torsional behaviour in harmonic drives. *Mechanism and Machine Theory*, *23*(1), 48–61. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.016

Mondal, S., Mitra, A., & Chattopadhyay, M. (2015). Mathematical modeling and simulation of Brushless DC motor with ideal Back EMF for a precision speed control. *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, ICECCT 2015*. https://doi.org/10.1109/ICECCT.2015.7225944

Olsson, H., Åström, K. K. J. J., Canudas de Wit, C., Gäfvert, M., & Lischinsky, P. (1998). Friction Models and Friction Compensation. *European Journal of Control*, *4*(3), 176–195. https://doi.org/10.1016/S0947-3580(98)70113-X

Rizos, D. D., & Fassois, S. D. (2005). Friction identification based upon the LuGre and Maxwell slip models? *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, *16*(1), 548–553. https://doi.org/10.1109/TCST.2008.921809

Rooks, B. (2006). The harmonious robot. *Industrial Robot: An International Journal*, *33*(2), 125–130. https://doi.org/10.1108/01439910610651446

Shetty, P., Subramonium, a. K. N., & Kumar, M. S. (2015). Mathematical Modeling of Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electric Scooter. *2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, (0), 1222–1226. https://doi.org/10.1109/CSNT.2015.110

Tibor, B., Fedak, V., & Ďurovský, F. (2011). Modeling and simulation of the BLDC motor in MATLAB GUI. *Proceedings - ISIE 2011: 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1403–1407. https://doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984365

Townsend, W. T., & Guertin, J. A. (1999). Teleoperator slave - WAM design methodology. *Industrial Robot: An International Journal*, *26*(3), 167–177. https://doi.org/10.1108/01439919910266820

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ESTUDIO COMPUTACIONAL DEL TIEMPO DE AUTOENCENDIDO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO EN IGNITION QUALITY TESTER (IQT)

COMPUTATIONAL STUDY OF AUTOIGNITION TIME OF LIQUID FUEL IN IGNITION QUALITY TESTER (IQT)

Ing. Nestor Maldonado Mora[*], PhD. Juan Miguel Mantilla Gonzalez[*]

[*] **Universidad Nacional de Colombia,** Facultad de Ingenieria, Gnum
Cr 30 # 45-02 edi411-111, Bogotá D.C., Colombia.
+57 312 302 0285
E-mail: {nimaldonadom, jmmantillag}@unal.edu.co.

Resumen: Se simula el tiempo de autoencendido de un combustible líquido, influenciado por el cambio de presión inicial en cámara y masa inyectada en una cámara de combustión cerrada. Este proceso se encuentra asociado a la prueba en un *Ignition Quality Tester (IQT)* [ASTM D6890-13b]. En este trabajo esta prueba es estudiada numéricamente usando el software Converge CFD. Se seleccionaron los modelos más apropiados de inyección de combustible líquido, rompimiento y evaporación de gotas, cinética de reacción y turbulencia. El modelo se valida contra resultados experimentales publicados. Se encuentran cambios significativos en el tiempo de autoencendido y en la forma en que la combustión se realiza dentro del IQT como función del combustible inyectado y la presión inicial.

Palabras clave: tiempo de autoencendido, ignition quality tester (IQT), inyección de combustible líquido.

Abstract: The self-ignition time of a liquid fuel is simulated, influenced by the change in initial pressure in the chamber and mass injected in a closed combustion chamber. This process is associated to the test in an Ignition Quality Tester (IQT) [ASTM D6890-13b]. In this paper, this test is studied numerically using the Converge CFD software. The most appropriate models of liquid fuel injection, drop breakup and evaporation, reaction kinetics and turbulence were selected. The model is validated against published experimental results. Significant changes are found in the self-ignition time and in the way combustion takes place within the IQT as a function of the injected fuel and the initial pressure.

Keywords: Ignition delay, Ignition Quality Tester (IQT), liquid flue injection.

1. INTRODUCCIÓN

El banco de pruebas de calidad de la ignición, o Ignition Quality Tester (IQT), es un sistema de combustión por inyección de combustible líquido,

que tiene volumen constante y está diseñado para medir la demora en el encendido (ID por sus siglas en ingles) de combustibles de baja volatibilidad (Allard et al., n.d.)(Allard et al., 1997). Utilizando el IQT junto con el procedimiento descrito en la norma ASTM D6890-13b ("ASTM d613-13: Standard test method for cetane number of diesel fuel oils.," n.d.), es posible medir el ID y con este, determinar el número derivado de cetano (DNC por sus siglas en inglés) de diferentes combustibles.

La norma ASTM D6890-13b establece que se debe tener aire en el interior de la cámara aislada (ver figura 1), este aire aumenta su temperatura gracias a un conjunto de calentadores eléctricos hasta alcanzar una temperatura de 545°C y una presión de 2.137 MPa. En estas condiciones se inyectan 82mg del combustible a ser estudiado y mediante el uso de un conjunto de sensores, se detecta el momento en el cual inicia la inyección (levantamiento de la aguja del inyector) y se mide el momento en el cual inicia la combustión, representada por un aumento de 138 kPa (pressure recovery point o PRP) de la presión de la cámara con respecto a la presión inicial de la prueba(Allard et al., n.d.). La diferencia entre el tiempo de estos dos sucesos medido en milisegundos da como resultado el ID (Bogin et al., 2011), tal y como se puede ver en la figura 2.

El número derivado de cetano se calcula usando la ecuación 1.

Donde el ID se debe introducir en milisegundos ("ASTM d613-13: Standard test method for cetane number of diesel fuel oils.," n.d.).

Además de permitir la medición del ID y la determinación del DCN, el IQT permite la validación de mecanismos de combustión y modelos de inyección como los reportados por (Bogin et al., 2014), en el cual se estudia el coeficiente de temperatura negativa de varios alquenos. También en (Bogin et al., 2011) se estudia la influencia del tamaño y velocidad de las gotas de combustible en la medición de la demora en el encendido. Así mismo, en (Bogin et al., 2013) se verifica el coeficiente de temperatura negativa en alquenos a bajas presiones, la evaporación y la relación aire-combustible de la mezcla. Además en (Alfazazi, Kuti, Naser, Chung, & Sarathy, 2016) se modeló la ignición de iso-octano usando un modelo lagrangiano en dos etapas.

En este trabajo se busca determinar la influencia que tienen la presión inicial de la cámara y la masa inyectada sobre el ID mediante un modelo computacional establecido en Converge CFD V 2.1.("Converge 2.1.0 Theory Manual," n.d.)

2. MODELOS DEL PROCESO DE INYECCIÓN

El proceso de inyección es de gran importancia en muchas aplicaciones industriales, entre las cuales se incluye la combustión. Sobre todo en aquellos casos en los cuales el combustible es inyectado de forma directa en la cámara de combustión (Stiesch, 2003). En estos tipos de procesos el combustible se encuentra en primer lugar en estado líquido y es necesario que este se atomice y evapore para que se pueda mezclar con oxígeno (o aire) y de esta forma se pueda llevar a cabo la combustión.

Existen dos formas principales de modelar fenómenos de chorro. El modelo de gota continuo (CDM por sus siglas en ingles), el cual plantea una ecuación para el chorro con 11 variables independientes lo cual implica un muy alto costo computacional(Stiesch, 2003). La segunda forma es usando los llamados modelos de gotas discretos (DDM por sus siglas en ingles). Estos modelos obtienen soluciones de la ecuación del chorro basado en modelos de Monte-Carlo, en los cuales tratan las gotas pulverizadas como partículas estocásticas llamadas parcelas (o parcels), las cuales se pueden ver como conjuntos de gotas idénticas que no interactúan entre sí, pero a su vez interactúan con otras parcelas.

Generalmente se trabajan dos tipos de ruptura de la columna de líquido, la primera de ellas, llamada ruptura primaria, ocurre directamente en la vecindad del orificio del inyector y describe la ruptura de la fase líquida intacta en las primeras gotas. El proceso por el cual estas gotas aun grandes se dividen en gotas más pequeñas es conocido como ruptura secundaria(Stiesch, 2003).

Se han desarrollado un conjunto importante de modelos que pretenden simplificar el análisis de la inyección, a continuación, se describen los principales según el fenómeno físico que modela.

2.1. Ruptura del chorro:

Para la ruptura del chorro los principales modelos son el Kelvin-Helmholtz (KH), el Rayleigh-Taylor (RT) y modificaciones de estos.

El modelo de *Kelvin-Helmholtz* se basa es el análisis de las inestabilidades que se producen sobre una columna de líquido como consecuencia de entrar en una atmosfera gaseosa con diferente densidad y velocidad(Stiesch, 2003).

Se considera la columna de líquido inyectada de diámetro igual al diámetro de la boquilla, en este caso 2*a* (ver figura 3), de forma discreta como una sucesión de gotas, las cuales mantienen la trayectoria del eje del inyector hasta el momento cuando ocurre el primer rompimiento, a partir del cual las gotas hijas se desvían. La amplitud de las perturbaciones η se irá incrementando exponencialmente por la interacción entre la fase líquida y la gaseosa con una tasa de crecimiento complejo $\omega = \omega_r + i\omega_i$ de tal modo que las perturbaciones se ajustan a una onda de Fourier (ecuación 2):

Donde η_0 es la amplitud inicial de la onda, mientras que el número de onda $k = 2\pi/\Lambda$ donde Λ es la longitud de onda.

Una versión modificada de este modelo es el llamado Kelvin-Helmholtz-ACT el cual incluye los fenómenos aerodinámicos, de cavitación y turbulencia en la ruptura primaria(Som & Aggarwal, 2010)

Los modelos KH son ampliamente utilizados tanto en ruptura primaria como secundaria.

Para el modelo Rayleigh-Taylor, las inestabilidades producidas en la interface gas-líquido son causadas por el arrastre aerodinámico de las gotas, por lo cual es un modelo usado principalmente en el rompimiento secundario, donde ya hay gotas. Para este modelo, la aceleración o aceleración de una gota es producida por la fuerza de arrastre entendida como (ecuación 3):

Donde v_{rel} es la velocidad relativa entre la gota y el gas y r es el radio de la gota

2.2. Arrastre de gota:

Para este caso se suele trabajar con dos modelos, el primero de arrastre en donde se determina el coeficiente de arrastre de las gotas teniendo en cuenta la variación de la forma de estas a medida que esta es afectada por las perturbaciones de los modelos de ruptura. Para el segundo modelo se asume que las gotas son esferas y se usa el coeficiente de arrastre de esta geometría.(“Converge 2.1.0 Theory Manual,” n.d.)

2.3. Modelo de colisión:

Para modelar las colisiones entre las parcelas existe el método sin contador de tiempo o (NTC por sus siglas en inglés), el cual implica un submuestreo estocástico de las parcelas dentro de cada celda. Con este modelo se tiene en cuenta los efectos de las colisiones en la velocidad y tamaño de las gotas, así como la variación del número de estas. (Schmidt & Rutland, 2000).

2.4. Interacción gota/pared:

Modelo de película en la pared: es un modelo hibrido el cual realiza algunos cálculos asumiendo cantidades individuales basadas en partículas y otros cálculos basados en películas. En este modelo se incluyen los fenómenos de iniciación de la película, conservación del momento de las gotas, rebote de aquellas gotas con un bajo número de Weber (We) y salpicadura para aquellos con alto número de We (“Converge 2.1.0 Theory Manual,” n.d.).

2.5. Modelo de evaporación:

El modelo de Frossling calcula la tasa de cambio del radio de las gotas debido a la evaporación de estas, a partir de la correlación de Frossling (ecuación 4):

Donde ρ_g y ρ_l son las densidades de la fase gaseosa y líquida de la gota respectivamente, r_0 es el diámetro de esta, D es la difusividad del vapor de líquido en el aire, B_d relación de fracciones másicas de la gota y Sh_d es el número de Sherwood de la gota (Amsden, O’Rourke, & Butler, n.d.).

3. MODELO COMPUTACIONAL

El modelo computacional es implementado en Converge CFD (“Converge 2.1.0 Theory Manual,” n.d.), y busca simular una inyección en estado transitoria de n-Heptano en una cámara de combustión similar a la presente en el IQT. El

mecanismo de reacción utilizado fue el "Converge n-heptane" el cual cuenta con 42 especies. Los modelos usados en la simulación y los parámetros de esta se definen en las tablas 1 y 2 respectivamente.

En la figura 5 se puede ver la malla con la cual se realizaron las simulaciones.

El modelo propuesto fue validado al comparar sus resultados con pruebas experimentales realizadas por (Bogin et al., 2011), tal y como se puede ver en la figura 6, de esta comparación se obtuvo un error de 2.14% en la medición del ID.

4. RESULTADOS

Se realizó un total de 4 simulaciones variando la presión de la cámara al iniciar la inyección y la masa inyectada. En la tabla 3 se especifican los parámetros de cada caso.

Los valores de presión y temperatura obtenidos en las 4 simulaciones junto con los resultados experimentales se reportan en las figuras 7 y 8 respectivamente.
Se calculo el ID de dos maneras, la primera de ellas usando el PRP y la segunda a través del cálculo de la derivada de la presión con respecto del tiempo (dP/dt), para ambos casos los resultados se presentan en la figura 9.

Se midió la penetración del combustible, definida como la distancia en la cual se encuentra el 95% de la masa inyectada, este valor se presenta en la figura 10.

Se determino adicionalmente la relación de equivalencia de combustible-aire a partir de las especies producto de la combustión (ver figura 11).

En la figura 12 se comparan los valores de masa líquida de combustible inyectado con la masa en estado gaseoso de dicho combustible como función del tiempo.

En las figuras 13 y 14 se reportan los valores de las emisiones en fracciones másicas de OH y CO_2 respectivamente y su relación con la masa de combustible en estado gaseoso, se decidió usar estas emisiones por estar directamente relacionadas con el ID.

Finalmente, en las figuras 15, 16 y 17 se reportan las distribuciones de temperatura de los 4 casos en 2 ms, 4 ms y 5 ms.

5. ANALISIS

De los resultados de presiones en la cámara para los cuatro casos (ver figura 7), se pude notar la influencia de la presión inicial de la cámara y de la masa inyectada en el ID. Al comparar el ID de los casos 2 y 3 (presión inicial de 4.2MPa) con los casos 1 y 4 (presión inicial de 2.1MPa), se puede ver claramente como al tener una presión mayor al momento de realizar la inyección de combustible se reduce significativamente el tiempo de encendido, debido principalmente al favorecimiento en las rupturas primarias y secundarias de las gotas a causa de la alta presión, causando a su vez una evaporación y mezcla más aceleradas. Por otro lado, al reducir la masa inyectada de combustible se evidencia un aumento en el tiempo de autoencendido, lo cual se debe a que, al contar con una menor masa, se obtienen mezclas pobres las cuales presentan mayor resistencia al encendido.
Al comparar las temperaturas obtenidas (ver figura 8), se puede notar como con mayores presiones en la cámara, se alcanzan temperaturas más bajas, lo cual esta directamente relacionado con el aumento en la masa de aire que debe ser calentado. Así mismo se puede ver como al inyectar una menor cantidad de combustible se obtienen temperaturas menores, debido a que se dispone de menos energía, la cual proviene directamente de la masa de combustible.

Al comparar las longitudes de penetración (ver figura 10), se nota una clara influencia de la presión de la cámara, al aumentar esta presión, el chorro de combustible encuentra una mayor restricción al movimiento por lo cual se presentan distancias de penetración mucho menores. Por otro lado, al reducir la cantidad de masa de combustible inyectado, es posible notar como se logran distancias de penetración similares, sin embargo, alcanzar estas distancias toma más tiempo que al

inyectar más masa, lo cual se debe a la influencia de la fuerza de arrastre sobre las gotas.

Al analizar el comportamiento de la relación de equivalencia combustible-aire (ver figura 11), se evidencia que a menores presiones mayor relación de equivalencia. Lo anterior se debe a que se cuenta con mucho menos aire en el interior de la cámara. Por otro lado, al inyectar menos masa (para una misma presión) se logran relaciones de equivalencia menores. Es importante tener en cuenta que el comportamiento de estas relaciones de equivalencia se ve fuertemente influenciado por la forma en la cual se realiza la inyección de combustible, la cual depende de la presión de la cámara, por lo cual se tienen formas diferentes de la relación de equivalentica al variar esta presión.

En la figura 12, al comparar la masa de combustible líquido inyectado con la masa de combustible gaseoso en la cámara, se puede evidenciar un retardo en la formación del combustible gaseoso. Esto está directamente relacionado con los procesos de ruptura del chorro líquido y de las gotas formadas (atomización), así como del proceso de calentamiento y cambio de fase de estas gotas.

En este estudio el análisis de emisiones se limitó a las especies OH y CO_2, (ver figuras 13 y 14 respectivamente), en ambos casos se comparan sus fracciones másicas con respecto a la masa gaseosa de combustible. Resulta interesante notar como al comenzar a consumirse el combustible gaseoso se inicia la formación de OH, así como de CO_2, lo cual indica claramente el inicio de la reacción. Es importante notar además que debido a que no todo el combustible se consume al iniciar la reacción, esta se prolonga a medida el combustible se transforma. Esto se puede ver de forma más clara en aquellos casos con mayor presión inicial (caso 2 y 3), donde debido a la alta presión se tiene un inicio de la reacción más temprano. A pesar de esto en ese instante se consume poco más que la mitad del combustible gaseoso, y debido justamente a esta alta presión, se tiene una reacción que tarda mucho más tiempo en llegar al equilibrio químico por lo cual la formación de estas especies se prolonga a lo largo de toda la simulación.

Se presenta una comparación de las distribuciones de temperatura en los 4 casos para 3 tiempos. Para el caso en el cual van 2 milisegundos de la simulación se puede ver (figura 15), las diferencias considerables de distribución de temperatura para cada uno. En el caso 1 se evidencia una zona fría a lo largo del eje de la cámara debido a la entrada del chorro de combustible en esta, así mismo se puede ver como en este instante no ha iniciado la combustión. Algo similar a esto ocurre en el caso 4, donde la zona fría es más corta, debido a que la masa inyectada es menor y esto causa que su penetración presente un retardo. Por otro lado, en los casos 2 y 3 se tiene que para este tiempo ya se ha iniciado la combustión y se puede ver claramente el frente de llama, al igual que con los casos 1 y 4, se presenta un retardo en la llama del caso 3 con respecto a la del caso 2, debido a la reducción en la masa inyectada.
Pasados 4 milisegundos (ver figura 16), se puede ver como para el caso 1, la reacción ya ha ocurrido y el aire comienza a enfriarse salvo por dos zonas. También se observa como el combustible frío continúa siendo inyectado al interior de la cámara. En el caso 2 se tiene una llama que continúa avanzando alejándose de la punta del inyector, algo similar ocurre en el caso 3, donde la llama avanza lentamente debido al efecto de la presión en la cámara. Para el caso 4 aún no se presenta un claro frente de llama, debido a que el ID inicia pasado los 4 milisegundos, sin embargo, se pude notar una zona caliente, en la cual ya ha iniciado la reacción entre el aire de la cámara y el combustible inyectado.
Finalmente, al ver la distribución de temperaturas pasados 5 milisegundos (ver figura 17), se observa como en los 4 casos continúa ocurriendo la inyección de combustible líquido en menor proporción. Para este tiempo ya ha ocurrido el ID de los 4 casos y es posible notar el avance de la llama, lo cual denota que la reacción se sigue llevando a cabo, de manera más lenta para los casos 2 y 3, debido a la alta presión como ya se mencionó.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo en Converge CFD para la inyección de n-heptano en un IQT, el cual fue validado con resultados experimentales obteniendo un error de 2.14% en la medición del ID. El modelo se utilizó para medir el ID al variar la

presión inicial dentro la cámara y la masa inyectada, presentando menores ID al aumentar tanto la masa como la presión. El modelo desarrollado permitió observar también como la distancia de penetración del combustible inyectado depende fuertemente de la presión de la cámara, donde para mayores presiones se obtienen menores penetraciones. Así mismo al inyectar menos masa se presenta un retardo en la penetración más no una reducción de esta.

Fue posible evidenciar también como existe un retraso importante entre la masa inyectada del combustible en estado líquido y la masa de combustible en estado gaseoso, debido a la combinación de los fenómenos de atomización, calentamiento y evaporación.

Finalmente, el modelo permitió estudiar la influencia de la masa inyectada y la presión de la cámara en el comportamiento de la reacción (42 especies del mecanismo de n-heptano de Converge CFD), identificando los diferentes frentes y avances de llama.

Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias a la empresa Convergent Science que fue la proveedora del software y las licencias académicas que permitieron obtener los resultados aquí expuestos.
.

REFERENCIAS

Alfazazi, A., Kuti, O. A., Naser, N., Chung, S. H., & Sarathy, S. M. (2016). Two-stage Lagrangian modeling of ignition processes in ignition quality tester and constant volume combustion chambers. *Fuel*. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.017

Allard, L. N., Hole, N. J., Webster, G. D., Ryan, T. W., Ott, D., Beregszazy, A., … Rickeard, D. J. (1997). Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester (IQT)- Part II. *SAE TECHNICAL*, (412).

Allard, L. N., Webster, G. D., Hole, N. J., Iii, T. W. R., Ott, D., & Fairbridge, C. W. (n.d.). Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester (IQT) SAE routinely stocks printed papers for a period of three years following date of Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester (IQT).

Amsden, A. A., O'Rourke, P. J., & Butler, T. D. (n.d.). KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays.

ASTM d613-13: Standard test method for cetane number of diesel fuel oils. (n.d.).

Bogin, G. E., Defilippo, A., Chen, J. Y., Chin, G., Luecke, J., Ratcli, M. A., … Dean, A. M. (2011). Numerical and Experimental Investigation of n -Heptane Autoignition in the Ignition Quality Tester (IQT), 5562–5572.

Bogin, G. E., Osecky, E., Chen, J. Y., Ratcli, M. A., Luecke, J., Zigler, B. T., & Dean, A. M. (2014). Experiments and Computational Fluid Dynamics Modeling Analysis of Large n - Alkane Ignition Kinetics in the Ignition Quality Tester.

Bogin, G. E., Osecky, E., Ratcli, M. A., Luecke, J., He, X., Zigler, B. T., & Dean, A. M. (2013). Ignition Quality Tester (IQT) Investigation of the Negative Temperature Coe ffi cient Region of Alkane Autoignition.

Converge 2.1.0 Theory Manual. (n.d.).

Schmidt, D. P., & Rutland, C. J. (2000). A New Droplet Collision Algorithm, *80*, 62–80. https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6568

Som, S., & Aggarwal, S. K. (2010). Effects of primary breakup modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines. *Combustion and Flame*, *157*(6), 1179–1193. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.018

Stiesch, G. (2003). *Modelling Engine Spray and Combustion Processes*. (Springer, Ed.).

ECUACIONES

Eq. 1 $DCN = 4.460 + 186.6/ID$

Eq.2 $\eta(t) = \eta_0 e^{ikx+\omega t}$

Eq. 3 $$\left|\vec{F}\right| = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho_g v_{rel}^2}{\rho_l r}$$

Eq.4 $$\frac{dr_0}{dt} = -\frac{\rho_g D}{2\rho_l r_0} B_d Sh_d$$

IMAGENES

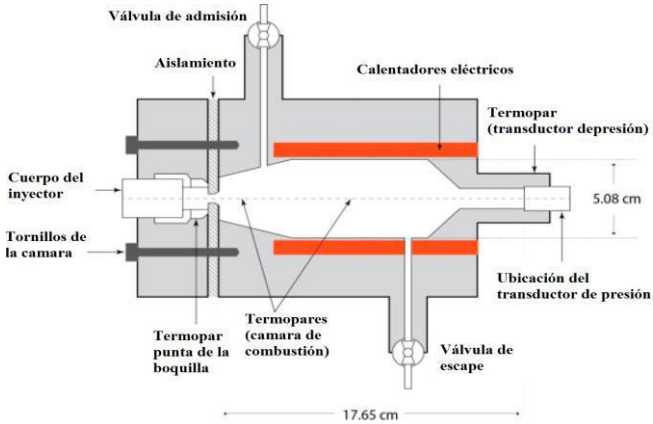


Fig. 1.Esquema de la cámara de combustión del IQT (Bogin et al., 2014)

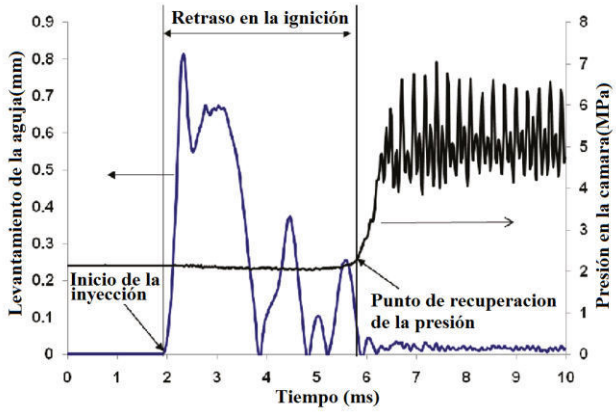


Fig. 2. Retraso en la ignición medido usando un IQT (Bogin et al., 2011).

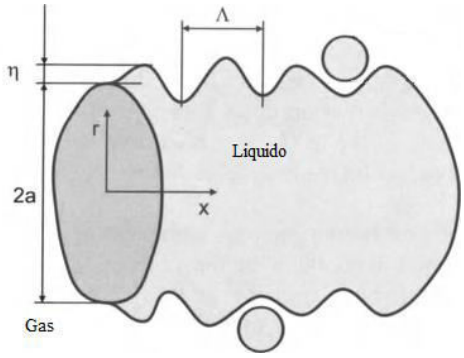


Fig. 3. Esquema del crecimiento de las perturbaciones superficiales en el modelo Kelvin-Helmholtz(Stiesch, 2003).

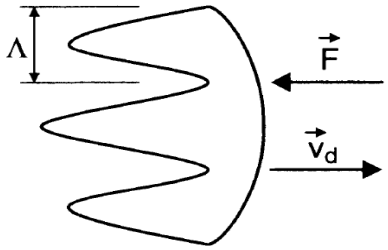


Fig. 4. Esquema de las inestabilidades en una gota de líquido según el modelo de Rayleigh-Taylor (Stiesch, 2003).

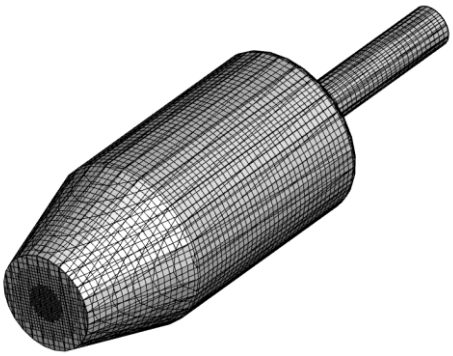


Fig. 5. Vista isométrica de la malla del IQT de ~200000 celdas.

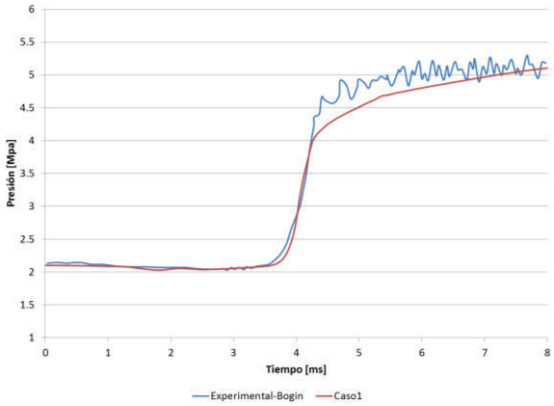


Fig. 6. Validación del modelo comparando las presiones en la cámara del IQT documentada por Bogin (Bogin et al., 2011) *y la presiones obtenidas en las simulaciones realizadas.*

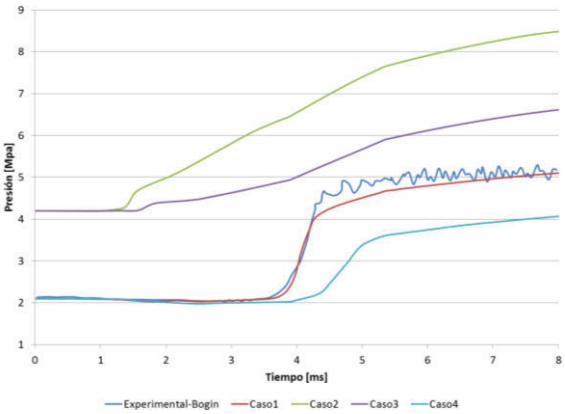


Fig. 7. Presiones en la cámara para cada uno de los casos.

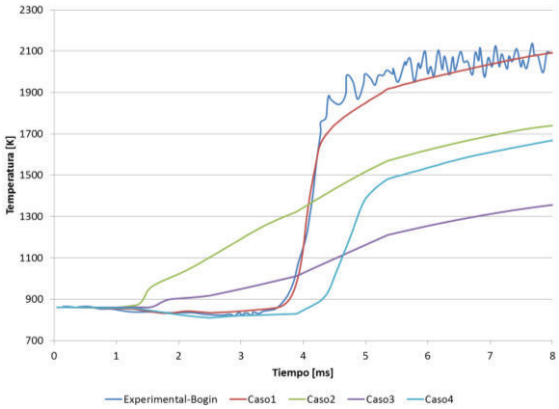


Fig. 8. Temperaturas en la cámara para cada uno de los casos.

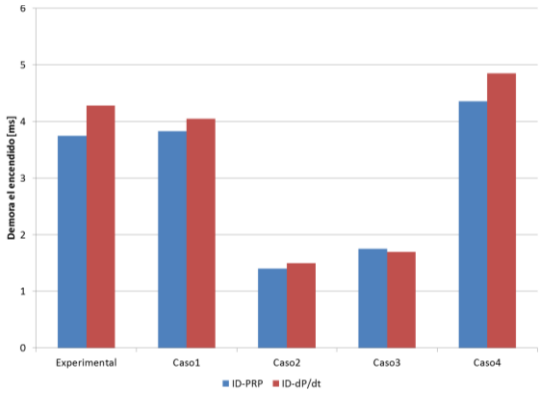


Fig. 9. Demora en el encendido de cada caso calculado por PRP y dP/dt.

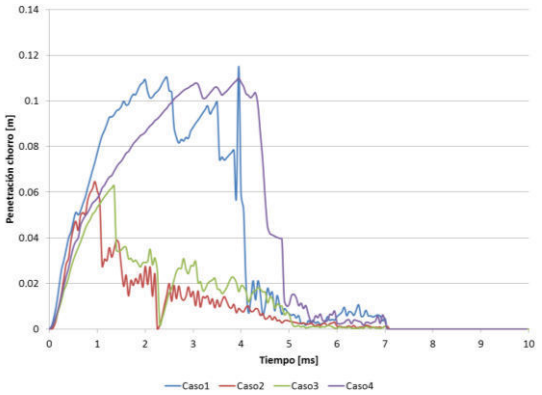


Fig. 10. Penetración del chorro para cada uno de los casos.

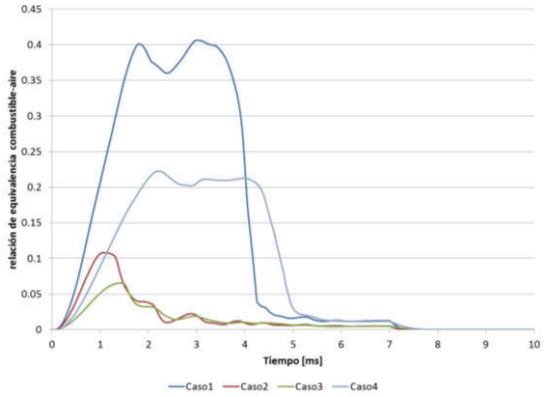


Fig. 11. Relación de equivalencia combustible- para cada uno de los casos.

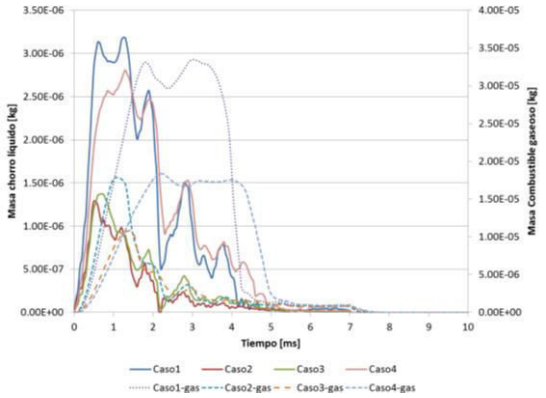


Fig. 12. Masa líquida de combustible inyectado y masa gaseosa de combustible en la cámara en cada caso.

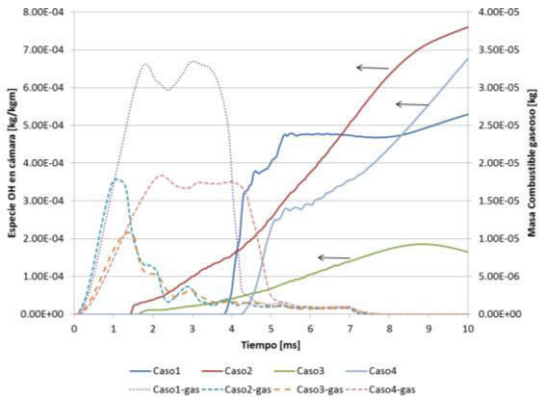


Fig. 13. Fracción másica de OH y masa gaseosa de combustible en la cámara en cada caso.

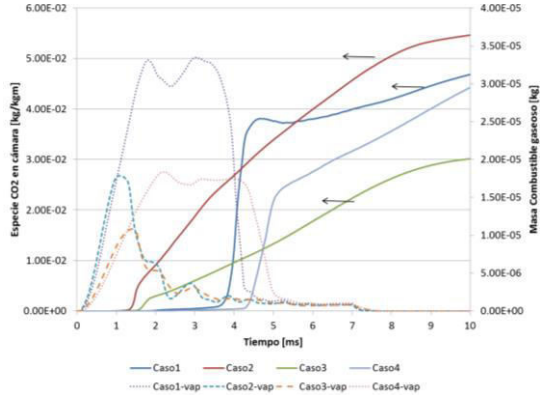


Fig. 14. Fracción másica de CO_2 y masa gaseosa de combustible en la cámara en cada caso

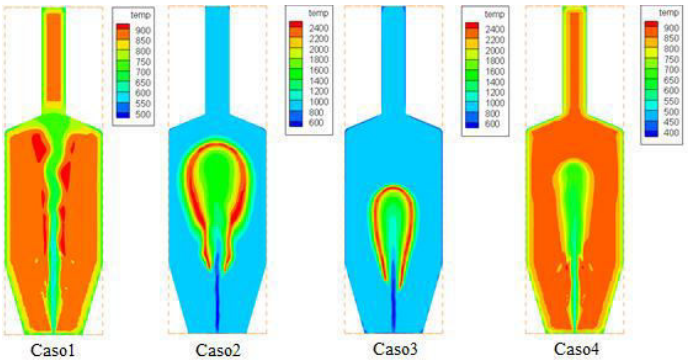


Fig. 15. Distribución de temperaturas en 2 ms para cada uno de los casos.

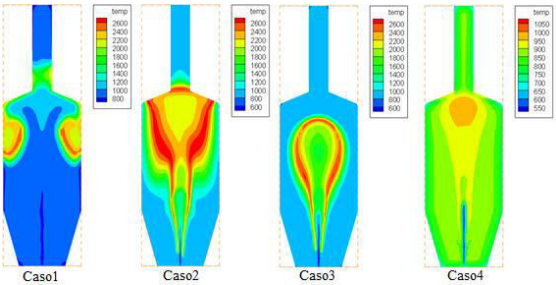


Fig. 16. Distribución de temperaturas en 4 ms para cada uno de los casos.

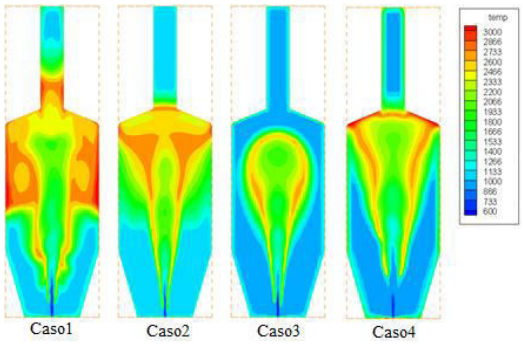


Fig. 17. Distribución de temperaturas en 5 ms para cada uno de los casos.

TABLAS

Tabla 1: Modelos usados en la simulación

Proceso de la inyección	**Modelo**
Ruptura del chorro	KH-ACT y RT
Arrastre de gota	Arrastre dinámico
Colisión	NTC
Interacción gota/pared	Película en la pared
Evaporación	Correlación de Frossiling

Tabla 2: Parámetros de la simulación

Parámetro	**Valor**
Número de parcels	69000
Número de celdas	206973
Tiempo de simulación [ms]	10
Combustible	n-Heptano (C7H16)
Duración de la inyección [ms]	7
Temperatura de inyección [K]	329,15
Temperatura de la cámara[K]	861
Angulo de inyección [°]	35
Modelo de turbulencia	κ-ε RANS
Número de Weber de rebote	5
Tipo de inyector	De cono solido
Forma de la tasa de inyección	Variable

Tabla 3: Presión en la cámara y masa inyectada en cada caso simulado.

Caso	Presión de la cámara [MPa]	Masa inyectada [mg]
1	2.1	82
2	4.2	71
3	4.2	39
4	2.1	53

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUERZA DE RESISTENCIA AERODINÁMICA EN UNA OJIVA TIPO CLARK-Y

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE AERODYNAMIC RESISTANCE FORCE IN A CLARK-Y TYPE OGIVE

José Luis Méndez Orellana [*], Luis Daniel Mendoza [**]

[*] **Universidad Nacional Experimental del Táchira,** Laboratorio de Aerodinámica.
Departamento de Ingeniería Mecánica
Av. Universidad. San Cristóbal, Venezuela
E-mail: jmendez@unet.edu.ve,
[**] **Universidad Nacional Experimental del Táchira,** Laboratorio de Aerodinámica.
Departamento de Ingeniería Mecánica
Av. Universidad. San Cristóbal, Venezuela
E-mail: lmendoza@unet.edu.ve

Resumen: En la Universidad Nacional Experimental del Táchira se ha puesto en marcha el Laboratorio de Aerodinámica y en este se ha ensayado un perfil tipo Clark-Y perteneciente a un cohete experimental. En el presente trabajo se ha fabricado, con tecnología de impresión tridimensional, un perfil tipo Clark-Y, con el fin de determinar la fuerza de resistencia aerodinámica. De igual manera, se ha usado la técnica de los elementos finitos para simular y determinar la fuerza de resistencia aerodinámica del mismo perfil, haciendo uso de la estela generada corriente abajo de la ojiva. Para ambos casos el resultado ha sido coherente.

Palabras clave: Aerodinámica, túnel de viento, elementos finito.

Abstract: At the Universidad Nacional Experimental del Táchira, the Aerodynamics Laboratory has been set up and a Clark-Y profile belonging to an experimental rocket has been tested. In the present work, a Clark-Y profile has been manufactured with three-dimensional printing technology in order to determine the aerodynamic resistance force. Similarly, the technique of finite elements has been used to simulate and determine the aerodynamic resistance force of the same profile, making use of the wake generated downstream of the ogive. For both cases the result has been consistent.

Keywords: Aerodynamic, wind tunnel, finite elements.

1. INTRODUCCIÓN

El origen de esta investigación está basado en los "Estudios preliminares para la fabricación de un cohete pequeño" realizado en la Universidad Nacional Experimental del Táchira (Gutiérrez y Wong, 1981) donde se determina la geometría, el material y la construcción del cohete pequeño. En otro trabajo relacionado al mismo cohete, intitulado "Programación del frente de llama en un

combustible sólido" (Romero, 1986) se seleccionó la configuración de la superficie de emisión del combustible que permite obtener un empuje constante. De igual modo, en el trabajo de investigación denominado "Dinámica del movimiento bi y tridimensional caso del cohete elemental" (Gutiérrez, 1991) se estableció los elementos básicos según los cuales se define la dinámica de vuelo de un objeto (cohete) autopropulsado. Estos elementos son: el comportamiento que tiene que ver con el rango de vuelo, velocidad y altura máxima, ángulo de disparo etc., y la estabilidad y control del cohete. Por otro lado, los mismos factores que contribuyen al vuelo producen efectos no deseables como la resistencia. La resistencia es la fuerza que tiende a retardar el movimiento de un cuerpo en el aire. En el siguiente trabajo se ha determinado la fuerza aerodinámica de resistencia utilizando el Túnel de Viento AF6109 instalado en la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET). A modo de verificación se ha utilizado la técnica de los elementos finitos para determinar la fuerza de resistencia aerodinámica usando la estela generada corriente abajo de la ojiva Clark-Y.

2. MÉTODO

2.1 Método experimental

Al inicio se dibujó la ojiva Clark-Y con la herramienta computacional Solid Edge v.14 tomando sus coordenadas (estas en función del porcentaje de la cuerda del perfil aerodinámico) a un plano *x-y*; ajustando el radio máximo a 18 mm y la longitud máxima a 163 mm. Luego se procedió a crear la curva con la opción spline y el sólido en revolución. Este archivo de datos CAD se transformó a un archivo de datos CAM y se utilizó una impresora 3D con un material plástico para obtener el prototipo a escala 1:2 de la ojiva Clark-Y. La Fig. 1 muestra el prototipo de la ojiva con el soporte de aluminio que se fabricó en el taller de máquinas-herramientas. En esta misma figura, se muestra el prototipo instalado en la sección de prueba del Túnel de Viento de Circuito Abierto AF6109 de la UNET, Fig. 2. La sección de prueba tiene 360mm de altura por 210mm de ancho y longitud de 500mm. La máxima velocidad en la sección de prueba es de 28 m/s (100Km/H). Una vez instalado el prototipo en la sección de prueba el túnel de viento se calibró a una velocidad de 20 m/s, con aire a 20 ºC. La velocidad y la presión fueron medidas con el manómetro de presión diferencial Testo 5128. La balanza electrónica mide la fuerza de sustentación (*L*), la fuerza de resistencia aerodinámica (*D*) y el momento de cabeceo (*M*). Las fuerzas fueron medidas en Newton. Para este caso, el momento de cabeceo es nulo porque la ojiva es simétrica. Debido a que sólo se necesita medir la fuerza de resistencia aerodinámica en vuelo horizontal, el prototipo se colocó a un ángulo de ataque de 0º. Se realizaron diferentes pruebas y en días distintos con el fin de obtener resultados promedios y coherentes.

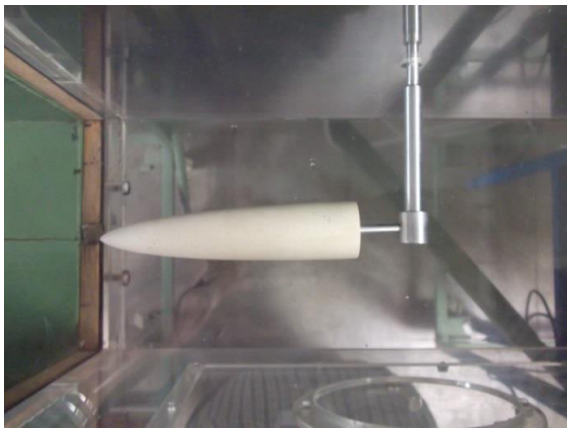


Fig.1. Prototipo de la ojiva Clark-Y y el soporte



Fig 2. Túnel de viento de circuito abierto. AF6109 Laboratorio de Aerodinámica. UNET

2.2 Análisis de la estela

El método seguido para el análisis de la estela corriente abajo de la ojiva Clark-Y es el mismo utilizado para predecir la fuerza de resistencia aerodinámica aplicado por (Jones, 1936) y editado por (Goldstein, 1965). La Fig. 3, muestra el área-dominio de la estela (rayas horizontales)

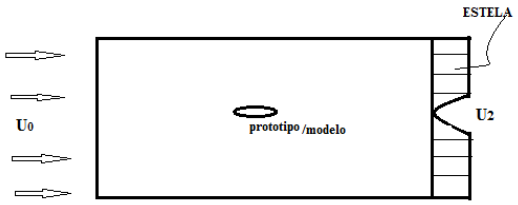


Fig.3. Área-dominio de la estela. Sección rayada

La fuerza de resistencia aerodinámica se determina empleando la siguiente ecuación:

$$D = \rho \iint U_2(U_0 - U_2)dS_2 \quad (1)$$

Donde:
D Fuerza de resistencia aerodinámica
ρ Densidad del aire
U_2 Velocidad en la estela
U_0 Velocidad inicial corriente arriba
dS_2 Área diferencial de la estela
Cabe destacar que esta es una técnica experimental antigua usada para predecir la fuerza de resistencia aerodinámica, donde se toman medidas en la estela (wake, en inglés) con un tubo de Pitot cerca del borde de salida del perfil aerodinámico.

2.3 Simulación numérica

Para el análisis numérico se usó la técnica de los elementos finitos con la herramienta ANSYS v12 la cual tiene la opción FLOTRAN CFD y el elemento 2D FLOTRAN 141. Este elemento es cuadrilátero con cuatro nodos y permite calcular las velocidades en los nodos y la presión. El modelo se realizó considerando la simetría de la ojiva y el tamaño del área de la sección de prueba del túnel de viento. De igual modo, se aplicaron las correspondientes condiciones de fronteras en el dominio; las cuales son, una velocidad inicial en los nodos corriente arriba y la velocidad cero en las paredes superior e inferior del dominio. La presión es igual a cero en los nodos que están corriente abajo del perfil. La Figura 4, representa el área discretizada de la sección de prueba del túnel de viento con el perfil Clark-Y.

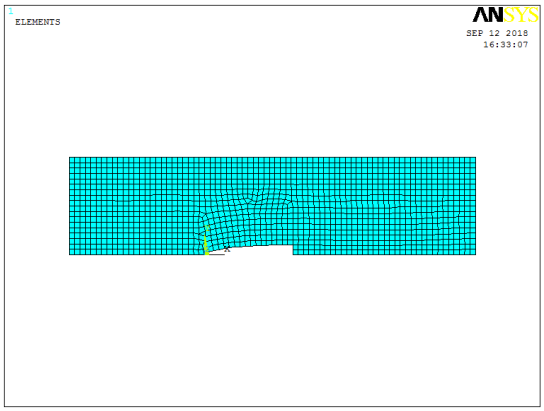


Fig. 4. Área discretizada de la sección de prueba

3. RESULTADOS

En la Tabla 1, se muestran los resultados de los ensayos experimentales realizados en el túnel de viento. El valor de la fuerza de resistencia aerodinámica, para diferentes ensayos fue de 0,3 N, para un número de Reynolds igual a 48000. La temperatura y presión en la sección de prueba fueron obtenidas del dispositivo electrónico conectado al tubo de Pitot y la densidad fue tomada del texto (Kuethe & Chow, 1976).

Tabla 1: Resultados de los ensayos

Nº	U_0 (m/s)	T (ºC)	P (Pa)	ρ (Kg/m^3)	Re	D (N)
1	20	28	248	1,23	4.8E4	0,3
2	20	28	250	1,23	4.8E4	0,3

En la Figura 5, se observa el campo de velocidades en la sección de prueba del túnel del viento y la ojiva Clark-Y, después de aplicar la simulación con la herramienta computacional ANSYS v12. En la

misma, se observa que la zona de mayor velocidad es de 26,39 m/s (color rojo) y está en el borde de salida de la ojiva Clark-Y. Sin embargo, para utilizar la Ecuación (1) se tomó la velocidad de 14,66 m/s (representada en color verde) porque es ahí donde está la estela (wake).

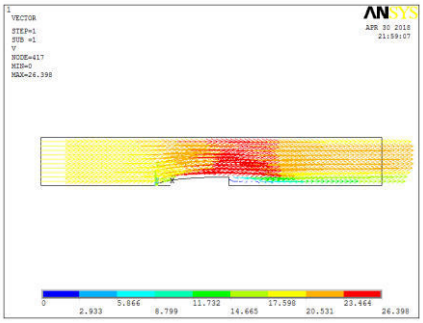


Fig. 5 Campo de velocidades

El área que se consideró para el cálculo de la fuerza de resistencia aerodinámica fue la mostrada con rayas en la Figura 3. Esta se obtuvo luego de restar el área del semicírculo, cuyo radio es 18mm, de la estela corriente abajo del área del rectángulo que está rayado. El valor obtenido de la fuerza de resistencia aerodinámica, utilizando la Ecuación (1) fue de 0,315 N. Si se compara este resultado con el obtenido experimentalmente en el túnel de viento AF6109, el cual, en promedio es de 0,3 N, se obtiene un margen de error de 4,72 %.

4. CONCLUSIONES

Con los resultados de esta investigación se puede concluir lo siguiente:

- Los ensayos experimentales realizados en el laboratorio de aerodinámica de la UNET, dio como resultado una fuerza de resistencia aerodinámica promedio de 0,3 N.
- Aun cuando se utilizó el enfoque experimental de Jones del año 1936, este se puede usar si se hace la simulación con una herramienta de dinámica de los fluidos computacional (CFD, siglas en inglés), lo que demuestra que el ensayo experimental se puede verificar con este tipo de técnica computacional o viceversa.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo fue subvencionado por el Decanato de Investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira. Venezuela

REFERENCIAS

Goldstein, S. (1965). *Modern Developments in Fluid Dynamics.* New York: Dover Publicationes,Inc.

Gutiérrez, T. (1991). *Dinámica del movimiento bi y tridimensional caso del cohete elemental.* San Cristóbal: Biblioteca UNET.

Gutiérrez, T. y Wong, V. (1981). *Estudios preliminares para la fabricación de un cohete pequeño.* San Cristóbal: Biblioteca UNET.

Jones, B. (1936). Measurement of profile drag by the Pitot-Tranverse Method. *Cambridge Aeronautics Laboratory, A.R.C. Reports and Memoranda* , No.1688.

Kuethe, A.y Chow, C. (1976). *Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design.* New York: John Wiley & Sons.

Romero, C. (1986). *Programación del frente de llama en un combustible sólido.* San Cristóbal: Biblioteca UNET.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

Análisis 3D mediante elementos finitos del diseño del sistema de fijación de placas craneales

3D Finite Element Analysis of the design of system fixing cranial plates

Sergio Carvajal[*], Rodrigo López[*]

[*] **Universidad Santo Tomas,** Facultad de ingeniería mecánica, Grupo de estudios y aplicaciones en ingeniería Mecánica GEAMEC.
Cra. 9 #51-11, Bogotá, Bogotá, Colombia.
E-mail: {sergiocarvajal, oscarlopez}@usantotomas.edu.co.

Resumen: El traumatismo craneal es causado por accidentes de tránsito, caídas, agresiones o en prácticas deportivas, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) este traumatismo es bastante común a nivel Mundial y significativo en Colombia, afectando a gran parte de la población, principalmente a personas menores de 45 años. El objetivo de este trabajo fue el de establecer una metodología que permitiera realizar el diseño personalizado de placas craneales, enfocándose en la optimización del mecanismo de anclaje de la placa al hueso que compone el cráneo. Para esto, el dominio de trabajo (cráneo) con la afectación craneal fue reconstruido a partir de tomografías computacionales, el diseño de la placa fue realizado mediante el uso de software CAD y mediante el uso de elementos finitos se determinó el comportamiento biomecánico del conjunto implantado, determinando el efecto mediante la aplicación de cargas de impacto del sistema de sujeción de la placa al tejido óseo.

Palabras clave: Cráneo, Tomografía, Elementos finitos, Biomecánica.

Abstract: The cranial traumatism is caused by accidents of traffic, falls, aggressions or in sports practices, according to the World Health Organization (WHO) this traumatism is common enough worldwide and significantly in Colombia, concerning great part of the population, principally to 45-year-old minor persons. The aim of this work was of establishing a methodology that was allowing to realize the personalized design of cranial plates, focusing in the optimization of the mechanism of anchorage of the plate on the bone that composes the cranium. For this, the domain of work (cranium) with the cranial affectation was reconstructed from tomography computational and the design of the plate was realized by means of the use of software CAD and by means of the use of finite elements the biomechanical behavior decided of the well-established set, determining the effect by means of the application of loads of impact of the system of subordination of the plate to the bony tissue.

Keywords: Skull, Tomography, Finite Elements, Biomechanics.

1. INTRODUCCIÓN

El traumatismo craneal es comunmente causado por accidentes de tránsito, caídas, agresiones o en prácticas deportivas, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), este traumatismo craneal es a nivel Mundial es una de las causas de muerte más significativas, afectando a gran parte de la población, principalmente a personas menores de 45 años según[1]. Jennett B. Manifiesta que es comúnmente conocido como la "epidemia silenciosa" por sus altos índices de mortalidad y discapacidad teniendo un índice de incidencia de 200 a 400 por 100.000 habitantes[2], de modo que es de utilidad el uso de métodos ingenieriles que lleven a la reconstrucción de placas craneales de forma rápida y eficaz, con aplicación de material con alta biocompatibilidad como lo es el titanio y sus aleaciones[3], por tal razón, se busca establecer una metodología que permita realizar el diseño personalizado de placas craneales, enfocándose en el mecanismo de anclaje de la placa al tejido óseo presente en el cráneo.
Para esto el dominio de trabajo (cráneo) con la afectación craneal en hueso frontal, es reconstruido a partir de tomografías computacionales, el diseño de la placa es realizado mediante el uso de software CAD, y utilizando el método de elementos finitos (MEF), donde encontramos aproximaciones de orden continuo a los problemas con el fin de establecer un numero finito de elementos, los cuales forman un mallado superficial en las piezas siguiendo la región geométrica y las aristas del mallado son conocidas como nodos que se encargan de definir el comportamiento de las funciones que describen el análisis computacional en el software ANSYS.

Por ende este método va a permitir transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado[4], donde se evalúan los efectos mediante la aplicación de cargas de impacto en el sistema de sujeción de la placa al tejido óseo; esto llega a permitir que pacientes que han sufrido traumatismos craneales puedan tener una mayor probabilidad de vida después de sus accidentes y que la afectación dentro de su sistema corporal sea menor a otros que no cuentan con estos sistemas.

2. METODOLOGIA

2.1 Reconstrucción craneal

2.1.1 Estudio anatómico

Para la reconstrucción craneal se hizo un estudio anatómico del cráneo donde se determinaron los huesos principales y sus componentes funcionales.
Los huesos craneales están formados anatómicamente por hueso cortical (duro) y hueso trabecular (blando), la zona afectada es el hueso frontal como se muestra en la (figura 1), considerado como hueso plano en la anatomía humana y conforma la parte de la frente hasta debajo de las cejas, el cual tiene simetría al plano sagital del cuerpo humano y cumple la función de proteger el encéfalo y los órganos de audición.

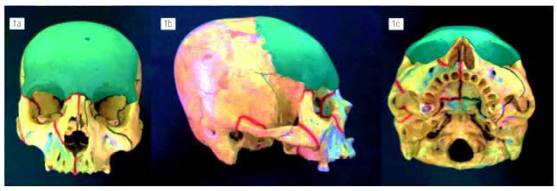


Fig. 1. Vista de los diferentes planos del hueso frontal en la sección 1a, 1b, y 1c para identificar la zona de trabajo.[5]

2.1.2 Reconstrucción a partir de tomografías computacionales

El procedimiento para realizar el diseño y análisis de los tipos de mecanismos de sujeción de placas craneales consistió en una primera etapa en la reconstrucción mediante el uso de tomografías computacionales de un cráneo con una afectación severa en el hueso frontal, como se observa en la (figura 2). Durante el proceso de reconstrucción fue necesario depurar la geometría del cráneo eliminando superficies que no harían parte de la zona afectada por la lesión, como se observa en la figura 3. Luego de eliminar las zonas no necesarias se suavizaron las superficies del cráneo para prepararlas y realizar el diseño de la placa craneal (ver figura 3).

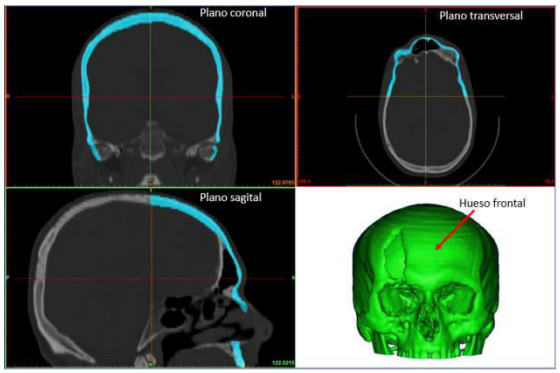


Fig. 2. Tomografías cráneo y afectación hueso frontal

2.2 Diseño y modelado de la placa craneal

Para realizar el diseño de la placa se necesita obtener la curva característica del cráneo, en la zona afectada con el fin de que la placa tenga el mismo perfil geométrico de un cráneo sin afectación y minimizar los problemas causados por el traumatismo.

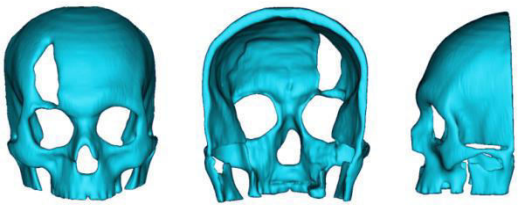


Fig. 3. Cráneo con acabado superficial

Para este fin se tiene la zona de trabajo (cráneo con afectación) en óptimas condiciones para minimizar posibles errores por material sobrante o excesivo, teniendo suavizado el cráneo (figura 3) y preparado el contorno de la placa (figura 4), se procede a delimitar la zona afectada y se crea una curva que se adapte a la fractura craneal formando así el contorno por donde va a ser generada la placa.



Fig. 4. Contorno zona afectada

Teniendo todos los parámetros definidos se inicia la reconstrucción de la placa en software CAD, modelando la geometría que mejor se adapte a la zona de afectación para lograr un mejor comportamiento entre la placa y el hueso frontal.

En la reconstrucción se tiene en cuenta la edad del paciente ya que es un factor fundamental, ya que, dependiendo de esta variable se sabe en qué etapa de desarrollo se encuentra el cráneo, en este caso no se tenía información del paciente, por este motivo se hicieron estudios cefalométricos[6], para definir las medidas antropométricas en las que se encuentra este caso específico y sé obtiene que es un hueso ya maduro, que puede oscilar entre los 20 y 45 años de edad, al cual ya se le puede realizar un sistema de sujeción adecuado, caso que no ocurre para los huesos de personas menores de 18 años, ya que se encuentran en desarrollo, lo que anexa variables no previsibles en su totalidad en sus medidas y características como material al pasar del tiempo.

Teniendo ya estas consideraciones se dispone a realizar el diseño y construcción de la placa (figura 5), en donde se considera la geometría de la lesión para el diseño apropiado del sistema placa – hueso frontal y realizar la mejor alternativa para este caso personalizado.



Fig. 5 Diseño placa

Una vez diseñado el implante con unas condiciones similares a las de un cráneo sin afectación, se inicia el análisis de los diferentes métodos de sujeción[7], que se pueden adaptar y estudiar su comportamiento óptimo en nuestro sistema, inicialmente con la placa preliminar (figura 6).

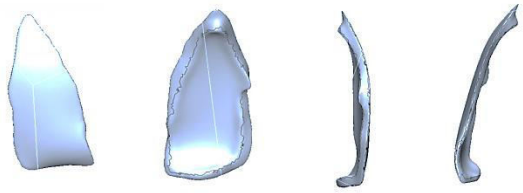


Fig. 6. Placa craneal

Para la obtención de datos iniciales y evaluación del comportamiento, se trabajó con la placa basándose en el método de sujeción oseointegración (proceso biológico de integración del implante y el hueso), teniendo como base la placa preliminar (figura 6).

2.3 Determinación del comportamiento biomecánico en ANSYS

2.1.1 Modelo de elementos finitos

Al diseño geométrico de la placa fue necesario realizar un suavizado en su perfil para lograr un contacto perfecto entre la placa y el hueso frontal, ya que si no ocurre puede causar problemas en la solución por medio de elementos finitos, presentando conflicto en los resultados, por esto, se debe garantizar que son dos elementos diferentes y se toman como una unión donde se definirá la zona de contacto o frontera de operación (figura 8).

Posteriormente ya con la placa y el cráneo en buenas condiciones para operación de análisis por elementos finitos en el software ANSYS se realiza la importación del conjunto a la interfase de Workbench (figura 7), donde se proceda a la discretización de la placa y el cráneo, con el fin de evaluar los efectos causados por cargas de impacto al sistema.

Para el análisis se realiza la determinación del comportamiento biomecánico entre la placa y el hueso frontal, donde se trabaja en el módulo estructural de Workbench ANSYS 19.1®. Para el análisis del sistema es necesario considerar las propiedades de los materiales, la geometría del modelo, las condiciones de frontera, las cargas y el enmallado de los diferentes sólidos.

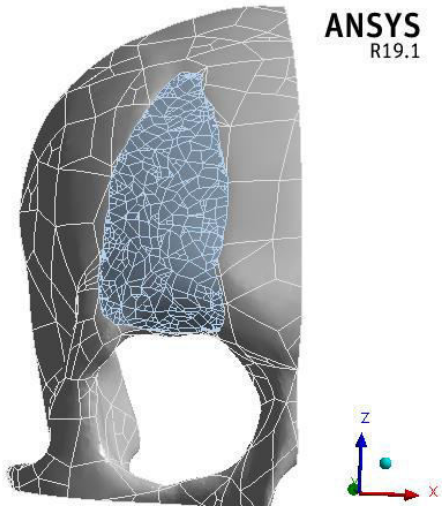


Fig. 7. Geometría craneal cargada en ANSYS Workbench módulo estructural.

2.1.2 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales son factores indispensables en la solucion de problemas de elementos finitos, ya que definen el comportamiento elastico, plastico, ductil, fragil, entre otras propiedades mecanicas, con el fin de describir el comportamiento estructural y simular lo que ocurre en la realidad con la aplicación de cargas dinamicas y estaticas.

En el proceso de solucion mediante software ANSYS es necesario cargar los materiales a el modulo *engeneering data* para generar los componentes que definen el comportamiento y obtener los resultados que se asemejan a la realidad, para esto se buscan las propiedades mecanicas del hueso frontal y del titanio puro, las cuales muestran los factores relevantes (tabla 1 y tabla 2).

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	1800	Kg/m^3
Módulo de Young's	12500	Mpa
Coeficiente de Poison	0,23	

Tabla 1. Propiedades mecánicas hueso frontal[8]

Propiedades	Valor	Unidades
Densidad	6420	Kg/m^3
Módulo de Young's	96000	Mpa
Coeficiente de Poison	0,36	

Tabla 2. Propiedades mecánicas titanio[9]

2.1.3 Condiciones de frontera, restricciones y cargas

Continuando con el esquema del proyecto, se generan las condiciones de frontera, para tal fin se realizó un contacto entre la placa y el hueso frontal de tipo Bonded [10] (simulando el proceso de oseointegración entre estos dos componentes) (figura 8).

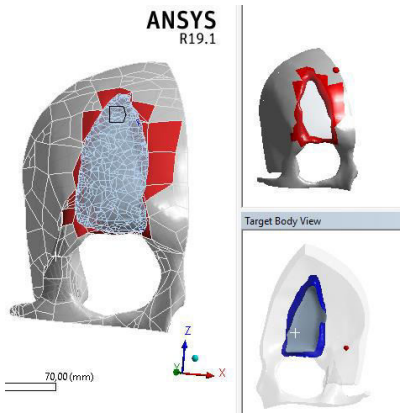


Fig. 8. Generación de contacto entre placa y hueso frontal.

Teniendo en cuenta las restricciones se fija el cráneo para que la carga aplicada, tenga un movimiento similar al de un cráneo que sufre una lesión severa por impacto en la placa, para esto se toman las regiones donde se realizaron los cortes en el plano sagital, coronal y transversal para tomarlos como soportes fijos.

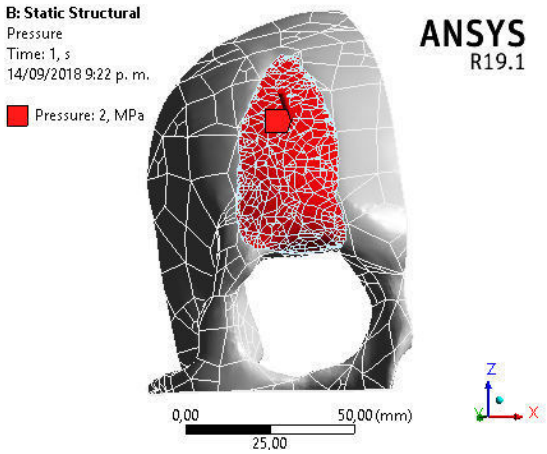


Fig. 9. Zona de aplicación de la presión

Para la presión aplicada [11] (figura 9) se determinó toda la superficie posterior de la placa, donde se analizo con el fin de observar el comportamiento del conjunto placa y tejido óseo frontal, para adecuar los diferentes tipos de sujeción, observar cual es el método óptimo para fijación de la placa, mejorando el sistema y reduciendo los sobre esfuerzos al cráneo.

2.1.4 Generación del mallado

Se realiza una operación de simetría en el cráneo recortando la geometría a la mitad, para disminuir el número de elementos a analizar y con esto ganar tiempo en la obtención de resultados, teniendo 352,110 nodos y 234,774 elementos en la malla generada (figura 10), con una calidad media y un tamaño grueso, el cual para la primera etapa se obtiene bastante información, que puede ser utilizada en análisis posteriores.

El mallado es un parámetro indispensable en la aplicación de este tipo de simulaciones, ya que por medio de este se genera una superficie ambigua a la geometría del cráneo y la placa, definiendo el comportamiento del sistema, recolectando información en cada nodo, para que la obtención de los resultados sea precisa.

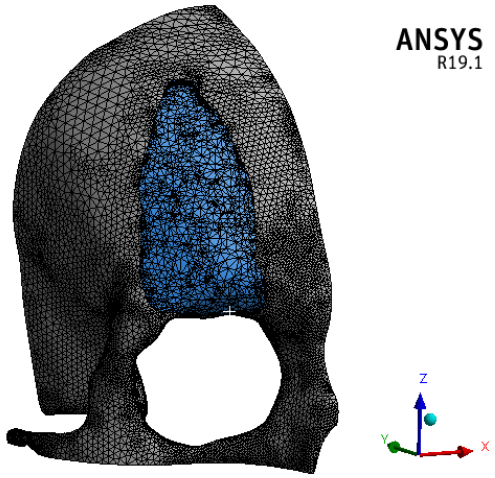


Fig. 10. Mallado

3. RESULTADOS

3.1 Esfuerzos en el cráneo y la placa

Como resultado del análisis realizado se obtuvo la distribución de esfuerzos y deformaciones del conjunto placa, cráneo. Con el fin de obtener el máximo valor de esfuerzos en el sistema y observar los puntos o zonas críticas, teniendo como resultado de máximo esfuerzo de 103,62 Mpa (figura 11), y se evidencia en la zona de color rojizo (zonas críticas) y color azul a zonas sin mayor afectación.

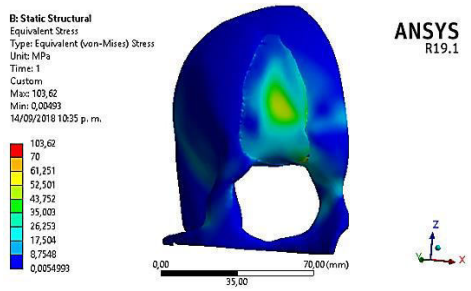


Fig. 11. Esfuerzo máximo y mínimo

Posteriormente, se observa que ocurre en cada componente por separado (figura 12 y 13), para poder determinar qué zona es crítica en el hueso frontal y en la placa.

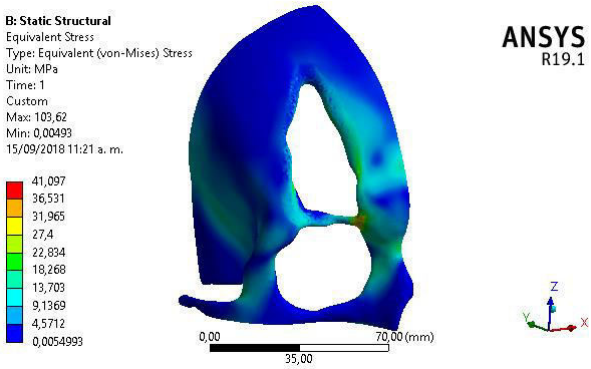


Fig. 12. Esfuerzos en cráneo

Analizando los esfuerzos máximos generados en el cráneo (figura 12), se puede identificar que no son críticos con un valor de 41,1 Mpa, por ende, da a entender que los esfuerzos máximos están en la placa (figura 13) y allí es donde se tiene que elaborar un diseño de sujeción que contribuya a minimizar los sobre esfuerzos.

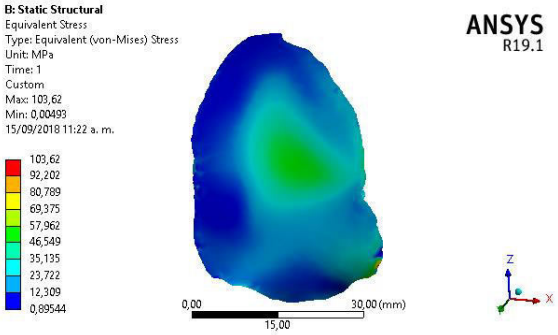


Fig. 13. Esfuerzos en placa

3.1 Deformaciones en el cráneo y la placa

Las deformaciones en el conjunto se presentan en la zona rojiza (figura 14), donde se habla en el orden de centésimas de milímetro de desplazamiento ocasionado, lo que quiere decir que con esta carga aplicada el efecto causado es mínimo tanto en la placa como en el cráneo ya que no supera el límite elástico del material.

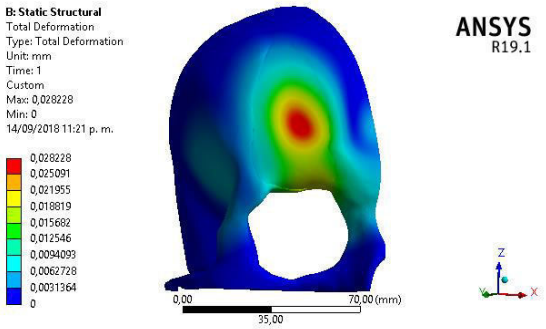


Fig. 14. Deformaciones

La mayor elongación presentada es de 0,028 mm en el conjunto hueso frontal, placa (figura 14).

4. CONCLUSIONES

Con el presente artículo se muestran los resultados iniciales para un análisis mediante elementos finitos a el conjunto (placa, hueso frontal) donde se determina que lo mejor para este tipo de geometría es realizar un suavizado óptimo para evitar la interferencia en la obtención de resultados, además teniendo como base los esfuerzos máximos o de Von mises para criterios de falla, se determina que el material se está comportando de una manera adecuada en el conjunto y que el diseño preliminar está listo para iniciar la elaboración de los tipos de anclaje de la placa al cráneo.

REFERENCIAS

[1] E. Tec and A. O. P, "Traumatismo Resumen," *Acad. Emerg. Med.*, vol. 17, no. 3, pp. 98–105, 2006.

[2] R. Domínguez Peña, R. Hodelín Tablada, and M. Antonio Fernández Aparicio, "Factores pronósticos en el traumatismo craneoencefálico grave. Prognoses factor in serious cranio-encephalic traumatism," *Mediciego*, vol. 16, no. 2, 2010.

[3] F.J. Gil y J.A. Planell, E. L. T. Comercia and M. Pijho, "Aplicaciones biomédicas del titanio y sus aleaciones," Dpto de ciencia de los materiales e ingenieria metalurgica, universidad politecnica de Cataluña. Biomecanica. pag 34-41 .

[4] N. Durango, "condiciones de frontera en el metodo elementos finitos," Ingenieria de desarrollo, universidad del norte. pp. 24–28, 1995.

[5] F. Avello-Canisto and A. Avello-Peragallo, "Nueva clasificación de las fracturas del tercio superior facial: consideraciones anatomo-quirúrgicas," *An. la Fac. Med.*, vol. 69, no. 4, pp. 272–277, 2008.

[6] R. R. Ramires, L. P. Ferreira, I. Q. Marchesan, D. M. Cattoni, and M. A. De Andrada e Silva, "Medidas faciais antropométricas de adultos segundo tipo facial e sexo," *Rev. CEFAC*, vol. 13, no. 2, pp. 245–252, 2011.

[7] DePuy Synthes., "MatrixNEURO. El sistema de placas craneales de la próxima generación." Division de synthes Gmbh 2016.

[8] C. Reads, "Desarrollo Tecnológico," *16. Gonzales., M; Isanza., J.; Desarro. un Model. FEM del complejo craneofacial para simular Trat. Rev. CES Odontol. Vol. 23-No.2, 2010.*, no. January 2010, 2016.

[9] L. Pérez Pozo, F. Briones Picheira, S. Lascano Farak, and C. Aguilar Ramírez, "Análisis de esfuerzos mediante el método de elementos finitos de implantes dentales de titanio poroso.," *Stress Anal. porous Titan. Dent. Implant. by using finite Elem. method.*, vol. 33, no. 1, pp. 80–97, 2015.

[10] S. T. Analysis, "Introduction to ANSYS Mechanical," pp. 1–14, 2012.

[11] M. C. Edgar and E. Ramírez, "Modelado de fractura del cráneo bajo condiciones de impacto," Universidad Nacional Autonoma de mexico, Facultad de Ingenieria mecanica. Pp 17.-28 2017.

CONTROL DE ACCIONAMIENTOS Y ENGRANAJES EN UNA CABINA DE SIMULACIÓN TÉRMICA, MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE NODERED

CONTROL OF DRIVES AND GEARS IN A THERMAL SIMULATION BOOTH, USING FREE SOFTWARE NODERED

A. Ríos Duque[*], Msc. A. Sepúlveda Giraldo[**]
PhD. N. Toro García [**], PhD. J. I. Cárdenas Jiménez[**]

[*] **Universidad de Caldas.**
Manizales, Caldas, Colombia.

[**]**Universidad Nacional de Colombia sede Manizales**,
Manizales, Caldas – Colombia (57+6) 8879300, jicardenasj@unal.edu.co

Resumen: El sistema, es un módulo mecánico de simulación de los efectos ambientales, por medio de sensores, motores y maquetas.El prototipo evalúa las condiciones térmicas y de velocidad de viento que inciden sobre estructuras a escala, para representar las afectaciones reales y posibles soluciones del modelo analizado. La estructura de aproximadamente 3 metros de longitud por 1,30 metros de ancho y altura variable, consta de una base giratoria de un metro de diámetro, la cual tiene un sistema de reducción mecánico con engranajes impresos en impresora 3D. El sistema cuenta con una tarjeta de control que permite la regulación de los motores, el control de la plataforma móvil y el control de la intensidad lumínica. Esta tarjeta es manipulada por un software libre NodeRed. El protocolo de comunicaciones está basado en la arquitectura de cliente/servidor (TCP/IP), la cual cuenta con una gran disponibilidad de conexiones de dispositivos electrónicos, fácil de implementar y maneja bloques de datos sin requerimientos previos.

Palabras clave: Reductores mecánicos, protocolo de comunicaciones, simulación, efectos ambientales.

Abstract: The system is a mechanical module for simulating environmental effects by means of sensors, motors and models. The prototype evaluates the thermal and wind speed conditions that affect structures of the model that represents the real phenomenon, in roder to evaluate the problems and possible solutions of the model analyzed. The structure of approximately 3 meters in length, by 1.30 meters in width and variable height, consists of a rotating base of one meter in diameter, which has a mechanical reduction system with printed gears by 3D printer. The system has a control card that allows the regulation of the motors, the control of the mobile platform, the control of the light intensity. This card is manipulated by a free software NodeRed. The communications protocol is based on the client / server architecture (TCP / IP), which has a high availability of electronic device connections, is easy to implement and handles data blocks without restrictions.

Keywords: Mechanical reducers, communications protocol, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el cambio climático ha producido grandes alteraciones en el equilibrio medioambiental entre el hombre y la naturaleza. Estos fenómenos ambientales pueden producir consecuencias nefastas en las infraestructuras físicas creadas por el hombre. Entre los efectos más apreciables tenemos:

1.1. Poder destructor del viento

Si la temperatura de los océanos se vuelve más cálida, las tormentas son más intensas. En los últimos 30 años, la intensidad y número de ciclones, huracanes y tormentas han aumentado y se han casi duplicado (http://www.cambioclimatico.org, 2018). Estos fenómenos pueden producir una drástica diferencia en la presión barométrica provocando la destrucción total o parcial, por el levante de los techos (cubiertas), causando grandes pérdidas materiales en las viviendas y enceres de las personas que habitan estas zonas.

En la zona caribe, dentro de la cual se encuentra Colombia, el efecto más dramático debido a la fuerza del viento son los huracanes, tormentas y vendavales. Cuando se presentan estos fenómenos climáticos las estructuras más afectadas generalmente pertenecen a personas de bajos recursos, dado que en muchas oportunidades estas edificaciones o construcciones son ilegales o clandestinas. Al no contar con permisos ni licencias de construcción, no ser diseñadas por un ingeniero o arquitecto licenciado, y no regirse por los códigos de construcción, este tipo de construcciones tienden a ser más vulnerables a los efectos de estos fenómenos naturales (ECLAC/UNEP, 1979), como puede apreciarse en la Figura 1.



Figura 1 Efectos vendaval en Balboa Cauca
Fuente: (Meneses, 2014)

Con un sentido social, desde la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, se encuentra en desarrollo el proyecto de investigación "***Procesos ambientales para el desarrollo e innovación de estructuras arquitectónicas y de seguridad alimentaria"***, en el cual un grupo de ingenieros se encuentra trabajando en el desarrollo de una estructura que permite reproducir diferentes tipos de condiciones ambientales, con el objetivo de estudiar el efecto de las variables físicas en modelos a escala de habitaciones de sectores vulnerables en Latinoamérica y poder extrapolar los resultados a escala real, mejorando la calidad de vida en estas comunidades.

En este trabajo presentan los elementos utilizados en el proceso de construcción de la cabina de simulación de condiciones ambientales. En el numeral 2 se hace la descripción de las partes y componentes físicas, control electrónico y de proceso de ambientación. En el numeral 3 se muestran el diseño mecánico y la programación del controlador con Node-Red. Y, Finalmente se presentan las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN

Para recrear un gran número de condiciones ambientales en el interior de la cabina, se desarrollo la forma de controlar y manipular diferentes variables, entre los cuales se tienen:

- Velocidad del viento

- Iluminación
- Temperatura ambiente
- Movimiento de rotación del piso.
- Humedad.

Teniendo en cuenta estos aspectos, a continuación, se describen brevemente los elementos utilizados en la construcción de la cabina simuladora.

2.1. Construcción física

La estructura implementada cuenta con una longitud aproximada de 3.0m de largo por 1,30m de ancho, y una altura modificable entre 0.5m y 1.2m. Tratando de mantener bajos los costos de construcción se propuso la utilización de ventiladores de 3.5 pulgadas de computador reciclados, para la zona de baja velocidad. Ver Figura 2.

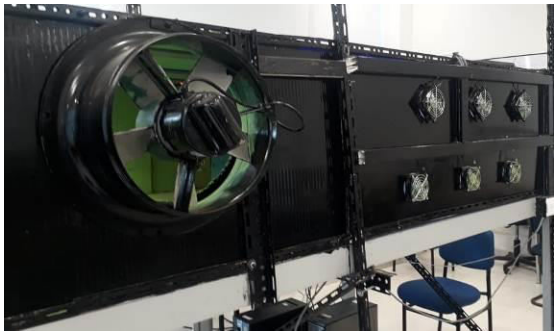


Figura 2. Estructura externa cabina de simulación condiciones ambientales

2.2. Área de simulación

El área interna disponible es de aproximadamente 3.9m^2, que se encuentra dividida en dos zonas, para la realización de diferentes tipos de experimentos en baja y alta velocidad de viento.

2.2.1. Zona de baja velocidad

Para el control de la velocidad del viento, esta zona se encuentra equipada con 14 ventiladores de 3,5 pulgadas de diámetro y una tensión de alimentación de 12VDC. En cada uno de los ventiladores se puede controlar la velocidad de manera independiente utilizando un controlador de modulación de ancho de pulso (Pulse Width Modulation-PWM).

En esta zona también se cuenta con un sistema de iluminación que permite realizar pruebas de crecimiento de plantas, utilizando un conjunto de barras con diodos emisores de luz Rojo-Verde-AZUL (Led RGB), que permite realizar iluminaciones con diferentes longitudes de onda en el espectro visible. Ver Figura .



Figura 3. Sistema de iluminación para realizar pruebas de crecimiento de plantas.

2.2.2. Zona de alta velocidad

El control de la velocidad de viento en esta zona se realiza con 2 extractores de 12pulgadas de diámetro, con una alimentación de 110VAC. Cada extractor es controlado independientemente por relés de estado sólido. Ver Figura 3.



Figura 3 Cabina de simulación de Condiciones ambientales (zona de alta velocidad)

El control de la temperatura ambiente, se realiza con un sistema de simulación de radiación solar, el cual consiste en una lámpara infrarroja de 1500W y una plataforma rotatoria de 1m de diámetro. Este sistema cuenta con control de velocidad variable,

que permite realizar la simulación de la rotación. Ver Figura 4.

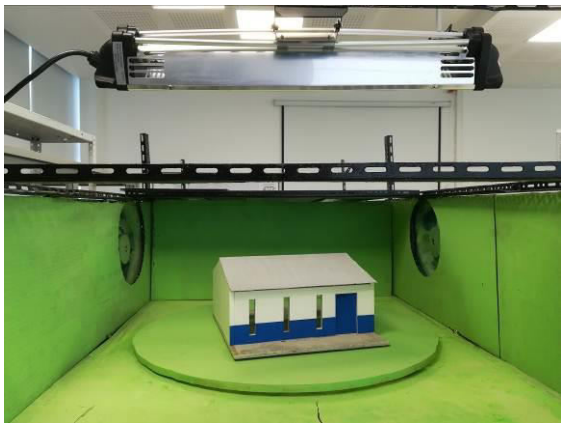


Figura 4 Sistema simulador de radiación solar (Plataforma y lámpara infrarroja)

2.3. Efecto de Reemplazo de Color (Chroma key)

Toda la estructura interna del simulador se encuentra recubierta de pintura color verde, este color puede ser reemplazado digitalmente con una imagen de fondo determinada, con el objetivo de ambientar la estructura arquitectónica en un entorno o lugar geográfico que así se estime conveniente, ver Figura 5.

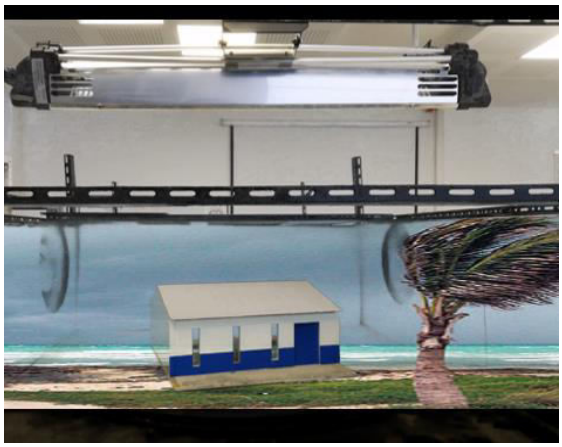


Figura 5 .Ejemplo de efecto Chroma key aplicado sobre la imagen de la Figura 4.

2.4. Sistemas de control electrónico

En la implementación del sistema electrónico de control se buscaron componentes de bajo coste y mantenimiento, así como el uso de software que no requiera pago de licencias. En el aspecto electrónico se seleccionó el entorno de desarrollo Arduino, en particular la placa Arduino Nano y el controlador de señales PWM (PCA7685), que permite manipular 16 canales PWM a 12 bits de resolución. Como driver de potencia se utilizó un conjunto de transistores Darlington ULN2803.

Para las comunicaciones con la tarjeta se utilizó el protocolo industrial de comunicaciones Modbus-RTU en modo esclavo, implementado sobre línea de datos RS 485. Ver Figura 6.

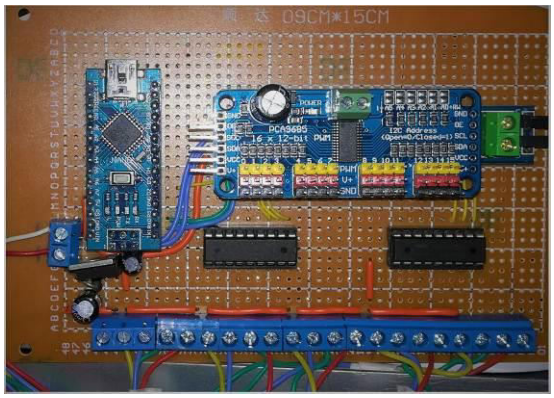


Figura 6 Tarjeta de control Arduino Nano PWM

2.5. Software de Control (NODE-RED)

Para el desarrollo del software se seleccionó la herramienta de visualización open-source creada por el equipo de tecnologías emergentes de IBM (IBM Emerging Technology) denominada Node-Red (Vega, 2015).

3. DISEÑOS MECANICOS Y PROGRAMA DE CONTROL

El editor de flujos de Node-Red consiste en una interfaz en HTML, accesible desde cualquier navegador (Figura 7), en la que arrastrando y conectando nodos entres si, es posible definir un flujo de datos que ofrezca un servicio estandar de comunicación con dispositivos externos y APIs (*Application Programming Interface*) de desarrollo de terceros como Twitter, Facebook, Yahoo!. (Fernández, 2016) (BBVAOpen4U, 2016) (Foundation, 2018).

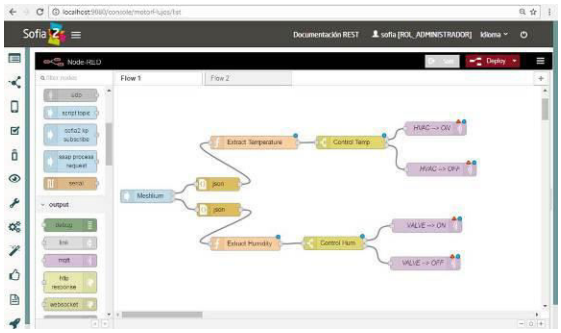


Figura 7 Interfaz de programación Node-Red
Fuente: (Fernández, 2016)

3.1. Diseño Soporte Plataforma giratoria

Uno de los elementos claves en la construcción de la cabina simuladora fue el diseño del soporte de la plataforma giratoria, su importancia radica en que es la encargada de soportar todo el peso de las estructuras arquitectónicas, además de garantizar un movimiento suave a diferentes velocidades, además se requería que fuera de fácil construcción y bajo mantenimiento. (Duque, 2017) Ver Figura 8



Figura 8 Sistemas mecánico de plataforma giratoria.

Se decidió utilizar como material base el plástico ABS (Acrylonitrile Butadiene Stirene), polímero utilizado en diversas aplicaciones industriales y que es conocido por sus excelentes propiedades mecánicas como resistencia al impacto y a la deformación, además es un material muy utilizado en las impresoras 3D de modelado por el método deposición fundida. (impresoras3d.com, 2018).

La forma y el tamaño del soporte fue determinado en primera instancia por las medidas del rodamiento de bolas NTN-SNR 7008, que es un rodamiento de uso general y de fácil consecución. El diseño logrado evita cambios bruscos en la geometría del modelo, lo que permite minimizar los esfuerzos en la zona de la pieza donde se acumulan las tensiones que podrían ocasionar rupturas. (Trujillo, 2007)

Por otro lado, se utilizaron cuatro puntos de apoyo con el fin de buscar una mejor distribución de las cargas a las que el soporte está sometido y lograr finalmente también un ahorro de material.

La pieza final diseñada para el soporte de la base giratoria utilizando el software de modelado mecánico en 2D y 3D**, SolidWorks** se presenta en la Figura 9.

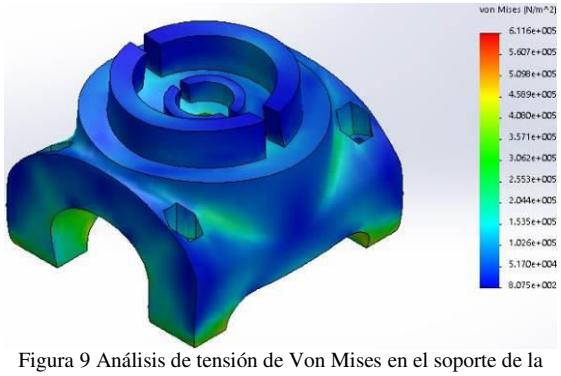


Figura 9 Análisis de tensión de Von Mises en el soporte de la plataforma giratoria

También se diseñó un tren de engranajes que permite transmitir la potencia del motor a la base giratoria. Se utilizaron engranajes con dientes helicoidales que gracias a la inclinación de los mismos permiten una mejor transmisión de velocidad y potencia que otro tipo de engranajes, además de vida útil más larga. (Gil, 1999) ver Figura 10.

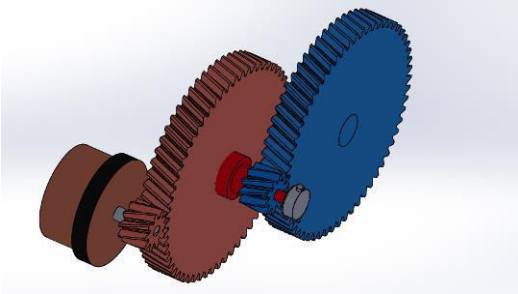


Figura 10.Tren de engranajes helicoidales

El sistema mecánico diseñado, se puede observar en su totalidad en la Figura 11.

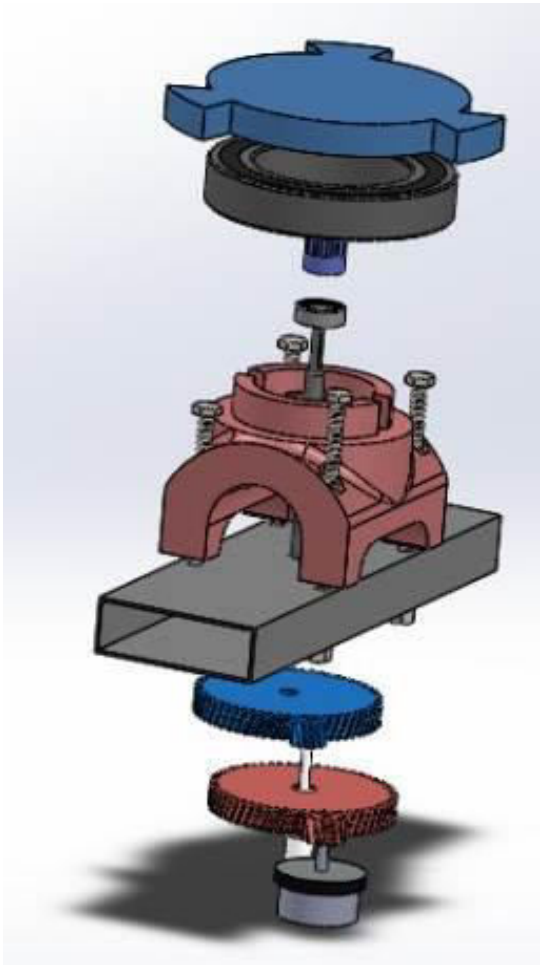


Figura 11. Sistema mecánico diseñado para la plataforma giratoria

3.2. Software de control Node-Red

La interfaz de usuario desarrollada en el software Node red, (Figura 12) permite el control de todos los elementos de la cabina de simulación, tomando los flujos de datos provenientes de botones y botones deslizantes y llevándolos a funciones específicas que permiten estructurar mensajes Modbus-RTU en modo Maestro y enviándolos a la tarjeta de control Arduino Nano, que interpreta estos flujos y toma las acciones correspondientes. Ver Figura 13.

Desde esta interfaz de usuario se puede controlar:

- Velocidad de todos los ventiladores y extractores de forma individual.
- La intensidad de iluminación de las barras led.
- Potencia suministrada por la lámpara de infrarrojos
- Control de velocidad de giro de la plataforma giratoria para la simulación de la rotación.
- Utilizando el protocolo de comunicaciones TCP-IP, Node-Red carga un servidor local que permite que la interfaz de usuario puede ser cargada en cualquier navegador de un dispositivo móvil. Ver Figura 15.

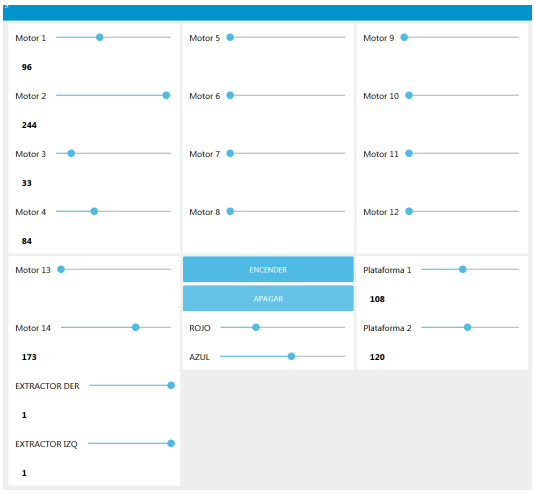


Figura 12 Interfaz de Usuario Node-Red (Control cabina simuladora)

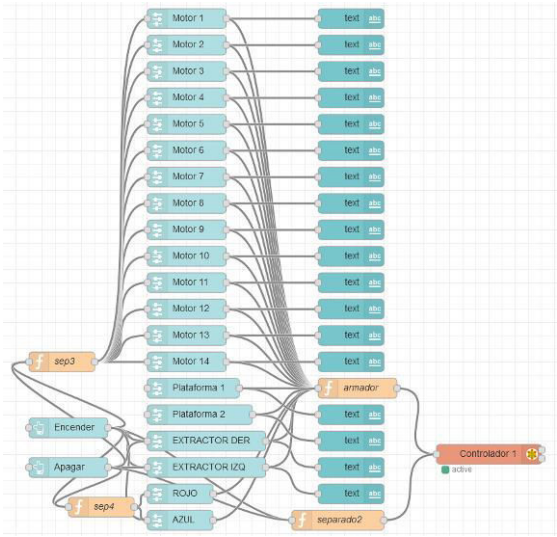


Figura 13 Flujos de Datos Interfaz Node-Red


Figura 15. Cabina de simulación de Condiciones ambientales - zona de baja velocidad. Cabina controlada desde dispositivo móvil.

4. CONCLUSIONES

- El análisis realizado a las piezas diseñadas del soporte de la plataforma (Tensión de Von Mises) permite verificar que las tensiones a las que estarán sometidas, siguen estando dentro de los parámetros admisibles por el material (ABS). Lo que indicaría un buen desempeño de las piezas

- Con el desarrollo de esta cabina, ya se cuenta con una herramienta muy importante en el estudio de problemáticas sociales que afectan a comunidades vulnerables.

- La estructura modular de la cabina de simulación, permitirá realizar modificaciones a futuro que permitan la ejecución de nuevas experimentaciones a un bajo costo.

- El uso de tecnologías de open-source, Node-Red permitió desarrollar una interfaz de usuario de bajo mantenimiento y alta flexibilidad para usuarios con poca experiencia o conocimientos en nuevas tecnologías.

RECONOCIMIENTO

Los investigadores ofrecen un especial agradecimiento a la convocatoria nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, creación e innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2016-2018, con el cual se pudieron tener recursos para el proyecto (código HERMES 35756) "***Procesos ambientales para el desarrollo e innovación de estructuras arquitectónicas y de seguridad alimenticia***". Igualmente al grupo de investigación en recursos energéticos GIRE (**Código colombiano de registro:** COL0144229) y al laboratorio de propiedades térmicas y dieléctricas de la Facultad de Ciencias exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.

Referencias

BBVAOpen4U. (07 de 06 de 2016). *Qué es una API y qué puede hacer por mi negocio*. Obtenido de https://bbvaopen4u.com/es/actualidad/que-es-una-api-y-que-puede-hacer-por-mi-negocio

Duque, H. D. (marzo de 2017). Metodología del diseño y modelado de un accionamiento mecánico. *Scientia et Technica*.

ECLAC/UNEP. (1979). *Natural Disasters Overview, Meeting of Government - Nominated Experts to Review the Draft Action Plan for the Wider Caribbean Region.* Caracas.

Fernández, J. (16 de 11 de 2016). *Sofia2 IoT Platform Blog*. Obtenido de https://about.sofia2.com/2016/11/16/que-es-nodered/

Foundation, J. (04 de 05 de 2018). *Flow-based programming for the Internet of Things*. Obtenido de https://nodered.org/

Gil, L. H. (1999). *Diseño de accionamientos y transmisiones de maquinas.* Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira.

http://www.cambioclimatico.org. (15 de 06 de 2018). Recuperado el 16 de Junio de 2018, de http://www.cambioclimatico.org/tema/efectos-del-cambio-climatico

impresoras3d.com. (01 de 01 de 2018). Obtenido de https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d/

Meneses, F. (2014). Declaran calamidad pública en Balboa por estragos de vendaval. corregimiento de Olaya: http://images.cdn-eltiempo.com/colombia/cali/declaran-calamidad-publica-el-vendaval-en-cauca/14794155.

Trujillo, J. E. (2007). *Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingenieria.* Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

Vega, R. (04 de 07 de 2015). *Node-RED: construye el Internet de las Cosas*. Obtenido de https://ricveal.com/blog/node-red-construye-el-internet-de-las-cosas/

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

COMPORTAMIENTO BIOMECÁNICO DE LA UNIDAD DENTOALVEOLAR (UDA) DE UN INCISIVO CENTRAL BAJO UN TRATAMIENTO ORTODÓNTICO, UTILIZANDO ARCOS DE NiTi Y NiTiCu: SIMULACIÓN 3D MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Rodrigo López[*], Rafael Ortega[*]
Diana Pacheco[**], Jimena Soler[**], Fernanda Pantoja[**], Fernanda Naranjo[**]

[*] **Universidad Santo Tomás,** Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de estudios y aplicaciones en ingeniería Mecánica GEAMEC.
Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
E-mail: {oscarlopez, rafaelortega}@usantotomas.edu.co.
[**] **Institución Universitaria Colegios de Colombia "UNICOC",** Posgrado en Ortodoncia y Ortopedia maxilar, Ciencias odontológicas, Biomateriales y tecnología para la restauración dental.
Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
E-mail: dpacheco@unicoc.edu.com, jsoler@unicoc.edu.co

Resumen: Durante el tratamiento de ortodoncia se pueden encontrar diferentes patologías tanto a nivel periodontal como radicular, las cuales se pueden intensificar si no se utiliza la biomecánica adecuada. Los dispositivos ortodónticos pueden producir cargas de gran magnitud dentro de la UDA originando una oclusión vascular y un corte en el suministro de sangre al ligamento periodontal (LPD). En los tratamientos ortodónticos es común el uso de arcos manufacturados en Nitinol (NiTi) y NitiCopper (NiTiCu) como fuente de generación del estímulo mecánico para producir los movimientos ortodónticos. En esta investigación se determinó que tipo de material para el arco (NiTi o NiTiCu) proporciona una mejor relación entre el estímulo mecánico y la respuesta biológica de la UDA. Para esto, se desarrolló una experimentación in-silico mediante el uso de elementos finitos, modelando los arcos ortodónticos como un material con memoria de forma (SMA). El dominio de trabajo fue obtenido mediante tomografía computacional diferenciando cada uno de los tejidos presentes en la UDA; hueso trabecular y cortical, diente y LPD. Como resultado se obtuvo el comportamiento biomecánico de la UDA y el campo de esfuerzos producidos en el ligamento periodontal y el hueso alveolar, determinando que tipo de material para el arco de ortodoncia disminuye el riesgo de patologías o movimientos ortodónticos no deseados.

Palabras clave: Ortodoncia, Elementos finitos, Biomecánica.

Abstract: In the orthodontics treatment is possible to find different pathologies at radicular and periodontal level, which can be intensified if no is used the adequate biomechanics. The orthodontics devices can produce large loads inside the UDA that cause a vascular occlusion and a cut in the blood supply to the periodontal ligament (PDL). In orthodontic treatments it is common the use of arches manufactured in Nitinol (NiTi) and NitiCopper (NiTiCu) as a source of generation of mechanical stimulus to produce orthodontic movements. In this investigation was determined what type of material for the arch (NiTi or NiTiCu) offers a better relationship between the mechanical stimulus and the biological response of the UDA. For this, an in-silico experiment can be done through the use of finite elements, modeling the orthodontic arches as a material with shape memory (SMA). The domain of the work was done by computed tomography differentiating each tissue present in the UDA; trabecular and cortical bone, tooth and PDL. As a result, was obtained the biomechanical behavior of the UDA and the stress field in the periodontal ligament and the alveolar bone, determining what type of material for the orthodontic arch decreased the risk of pathologies or incorrect orthodontic movements.

Keywords: orthodontic, finite elements, biomechanical

1. INTRODUCCIÓN

En el tratamiento de ortodoncia se busca mover los dientes a una posición específica mediante la aplicación de fuerzas sobre el diente y toda la unidad dentoalveolar. Los arcos de ortodoncia son los responsables de transferir la carga que mueve los dientes, permitiendo transmitir fuerzas suaves y continuas con la máxima eficiencia y el menor daño biológico, preservando la integridad del periodonto y la remodelación ósea fisiológica. (Schemann *et al.,*2012)

Para la selección de los arcos de ortodoncia, es importante tener en cuenta varios factores como calibre, resiliencia, alta flexibilidad, biocompatibilidad, tipo de aleación, fricción entre el arco y el bracket. Algunas de las aleaciones más usadas en ortodoncia en la fase inicial de alineación y nivelación son níquel-titanio (NiTi) y Níquel Titanio cobre (NiTiCu), las cuales poseen una capacidad de memoria de forma (SMA) con una curva de esfuerzo-deformación definida y un amplio rango de activación e histéresis. (Bhat *et al.,*2012)

En el movimiento dental ortodóntico ocurre un proceso fisiológico de reabsorción por parte de las células osteoclásticas, es la actividad básica que permite que el hueso se remodele y los dientes se muevan. Estas células son llevadas por la sangre al sitio de su actividad y traen como resultado la reabsorción ósea, Si la fuerza es excesiva y supera la presión capilar de 20-25 gf/cm2 se producirá una necrosis del ligamento periodontal, creando zonas de hialinización impidiendo el movimiento dental. (Cossetin *et al.,*2012)

En ortodoncia se han estudiado dichos fenómenos a través de varios métodos, uno de ellos es el análisis 3D mediante elementos finitos o FEA, es una técnica de modelación matemática que examina la distribución de esfuerzos y deformaciones de un modelo geométrico al cual se le asignaran propiedades reales. El FEA es un método numérico que simula un fenómeno físico real, a través de un modelo geométrico, discretizando el dibujo en pequeñas partes llamadas elementos finitos. Este método permite modelar estructuras con una geometría compleja como los dientes, ligamento periodontal y hueso alveolar. (Baek y Cha ,2012)

El objetivo del presente trabajo es determinar el comportamiento biomecánico de la unidad dentoalveolar utilizando dos tipos de arcos (NiTi) y (NiTiCu) mediante simulación por elementos Finitos en fase de alineación y nivelación. Para llevar a cabo este proceso se realizó una reproducción a escala real utilizando la herramienta Set-up, la cual es útil en el diagnóstico de ortodoncia permitiendo revelar las condiciones oclusales del paciente en las tres dimensiones del espacio. (Araujo *et al.,*2012)

Una vez identificada las condiciones oclusales del paciente, se realiza un modelo 3D a partir de tomografías computacionales que reproducen los tejidos normales que conforman la unidad dentoalveolar: diente, ligamento periodontal, hueso cortical y hueso trabecular. Para los componentes externos de la UDA: arco de ortodoncia y bracket, Se realiza una reproducción 3D de dichos componentes haciendo uso de la metrología con los elementos reales.

1. CARACTERIZACIÓN MATERIAL CON MEMORIA DE FORMA (SMA)

El comportamiento super elástico de una aleación con memoria de forma SMA, se asocia con la transformación que se induce por esfuerzo a una temperatura superior de **Af** "temperatura final de austenita a cero esfuerzos", donde la aleación pude deformarse elásticamente a niveles superiores de los normales con una carga en la fase austenítica, una aleación SMA como el NiTi que puede deformase elásticamente hasta un 8%, en comparación a los materiales lineales que alcanza menos del 1%. La aplicación de la carga induce la transformación de austenita en martensita, después de la fase de descarga, la fase martensita se vuelve inestables y se transforma de nuevo a su fase austenítica original, lo que da como resultado una recuperación total de la deformación al eliminar la carga como se observa en la **Fig. 1**. (Leonardo Lecce *et al,* 2014)

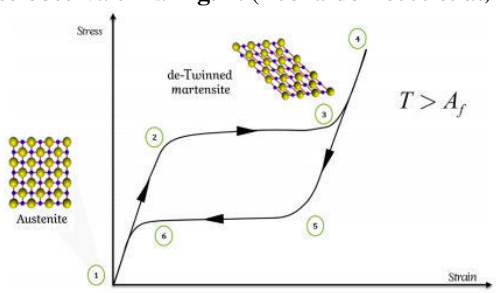


Fig1. *Super elasticidad SMA grafica esfuerzo – deformación* (Leonardo Lecce *et al,* 2014)

Para caracterizar las propiedades mecánicas de un SMA, se evalúan las propiedades mecánicas entre las fases martensita y austenita. Aplicada en la medición del esfuerzo y la deformación.

Un SMA presenta un comportamiento no lineal en la gráfica esfuerzo – deformación como se observa en la **Fig. 2**, durante la fase de carga la respuesta es casi lineal en un nivel de esfuerzo (**σMs**) donde la rigidez cambia y se observa un comportamiento similar al esfuerzo plástico dándose la formación de una "meseta". A medida que el esfuerzo aumenta un segundo nivel (**σMf**), la meseta termina y la respuesta se endurece. Durante la fase de descarga, la respuesta inicial es casi lineal y se forma una meseta con la misma longitud de deformación observada durante la carga a un nivel de esfuerzo más bajo (**σAs**). Al final de la meseta el esfuerzo disminuye a un nivel (**σAf**), donde la respuesta se endurece y se vuelve casi lineal, siguiendo la misma pendiente que se observó durante la carga. (Leonardo Lecce *et al,* 2014)

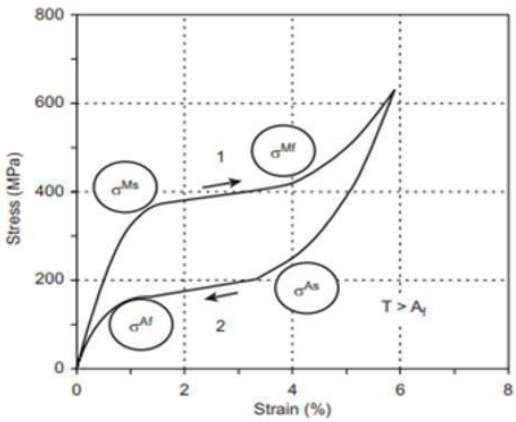


Fig2. *grafica esfuerzo – deformación SMA* (Leonardo Lecce *et al,* 2014)

σMs o SAS: Inicio del esfuerzo para la transformación de martensita
σMf o FAS: Fin del esfuerzo para la transformación de martensita.
σAs o SSA: Inicio del esfuerzo para la transformación de austenita.
σAf o FSA: Fin del esfuerzo para la transformación de austenita.
Épsilon: Esfuerzo residual máximo.

Alpha: relación de tensión – compresión.

2. DOMINIO DE TRABAJO – UDA

Para el diagnóstico en el tratamiento de ortodoncia en ocasiones es necesario realizar exámenes como las tomografías, estas permiten identificar las condiciones que puede presentar la UDA. Una vez obtenida la tomografía se observa que él paciente no presenta ninguna condición clínica en la UDA por lo que se establece como una (UDA – normal).

Una vez se identificada la condición clínica como (UDA-normal), se hace uso de la herramienta set-up con el fin de identificar la condición oclusal del incisivo central número 11 en la tomografía llevada al software de modelación CAD, **Fig. 3**

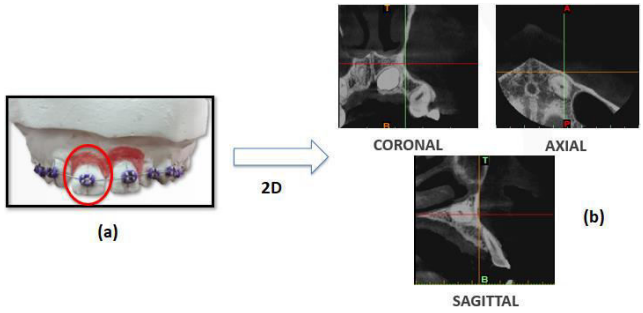


Fig. 3 (a) Set-up incisivo central número 11. (b) tomografías incisivo central número 11 *[autor]*

Para obtener el modelo 2D que representa la (UDA-normal), se hace uso de tomografías con condiciones normales y se realiza la reconstrucción 2D de la unidad dentoalveolar: Diente, ligamento, hueso cortical y hueso trabecular, **Fig. 4**.

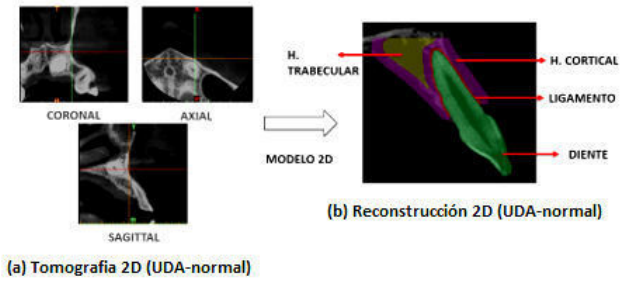


Fig. 4 (a) Tomografía 2D (UDA-normal). (b) reconstrucción 2D (UDA-normal) *[autor]*

Realizada la reconstrucción 2D de la (UDA-normal), se lleva la reconstrucción a un modelo 3D como se observa en la **Fig. 5**, esto con el fin de obtener un modelo mucho más aproximado a la realidad identificando sobreposiciones que puedan estar presentes en los componentes internos de la UDA.

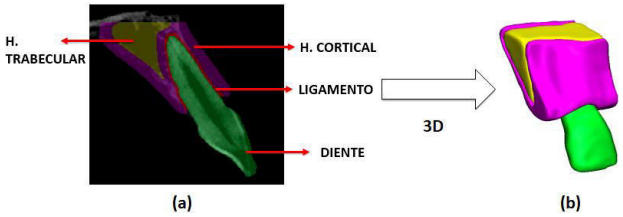


Fig. 5 (a) 2D (UDA) normal. (b) reconstrucción 3D (UDA-normal) *[autor]*

Una vez obtenido el modelo 3D y comprobada la geometría interna de no presentar sobreposiciones en cada uno de sus componentes internos, **Fig. 6**, se lleva el modelo 3D de la UDA-normal a un software de modelación CAD con el fin de obtener el ensamble entre la UDA y los componentes externos.

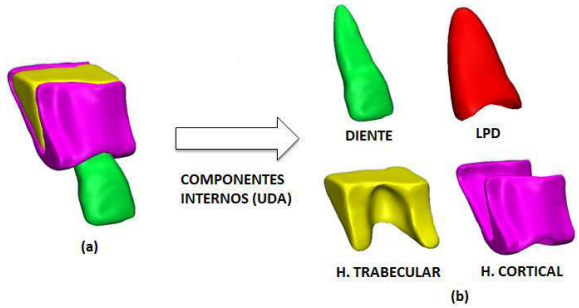


Fig. 6 (a) 3D (UDA-normal). (b) componentes internos (UDA-normal) *[autor]*

3. COMPONENTES EXTERNOS UDA

La primera fase del tratamiento de ortodoncia implica alineación y nivelación. En esta etapa los arcos de ortodoncia y los brackets juegan un papel importan al corregir las discrepancias verticales y horizontales, cuando se realizan movimientos dentales leves dentro del hueso alveolar para obtener la forma óptima del arco dental, una oclusión funcional y la sonrisa deseada. Es importante conocer los movimientos del diente para lograr los objetivos del tratamiento de ortodoncia en un menor tiempo. (Kapila S *et al*,1998)

3.1. BRACKET

En cada diente que un ortodoncista quiere mover se coloca un bracket especifico el cual tiene su propia prescripción y torque, la mayoría de estos brackets están hechos de acero inoxidable. A medida que el espacio de la ranura del bracket se ocupa por el arco de ortodoncia el bracket mueve el diente a una posición determinada.

Para replicar el movimiento presente en el sistema dental por el bracket, se utilizó un bracket estándar slot 0.022 x 0.028”, del cual se obtuvieron las dimensiones del bracket real esto con el fin de llevarlo a un modelo 3D, **Fig. 7** para su posterior ensamble con la unidad dentoalveolar.

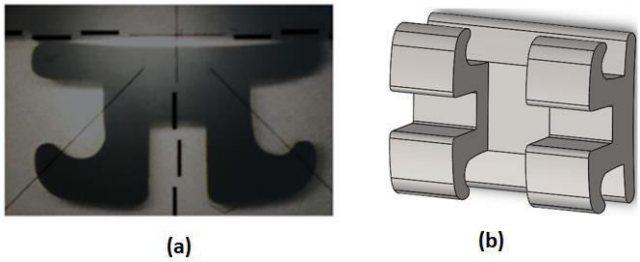


Fig. 7 (a) Metrología bracket. (b) modelo 3D bracket *[autor]*

3.2. ARCO DE ORTODONCIA

Durante el tratamiento de ortodoncia los arcos juegan un papel importante al liberar la energía acumulada en su lugar de posición aplicando fuerzas y torques al sistema dental a través de los aparatos donde se sitúan. Por lo tanto, el ortodoncista debe tener el conocimiento adecuado del comportamiento biomecánico que se presenta en la UDA y reconocer las aplicaciones clínicas de los arcos de ortodoncia según la condición que presente el paciente. (Ravichandra Sekhar Kotha1 *et al,* 2014)

Para replicar el desplazamiento que se genera en el arco de ortodoncia al deformarse se utilizó un arco de ortodoncia de calibre 0.014” con 2 tipos de aleaciones con memoria de forma (NiTi) y (NiTiCu). Para representar el modelo 3D del arco de ortodoncia se realizó un modelo a escala real, teniendo en cuenta la oclusión que presenta el incisivo central superior número 11 como se representa en el modelo del “set-up”. Una vez identificada el área de trabajo, **Fig. 8** se realiza la metrología necesaria para obtener la sección del arco de ortodoncia que se va a usar en la UDA.

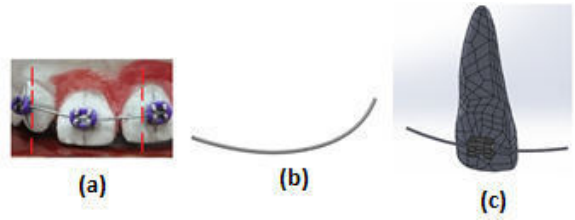


Fig. 8 *(A) set up incisivo central # 11 (B) arco de ortodoncia (c) ensamble modelo 3D [autor]*

4.2.1 ARCO DE ORTODONCIA NiTi

Los arcos de ortodoncia sufrieron grandes cambios al llegar las aleaciones con memoria de forma (SMA), las aleaciones de NiTi son altamente no lineales y presentan un gran ciclo de histéresis en el dominio elástico. Con el fin de determinar las propiedades mecánicas en aleaciones de NiTi se realizaron pruebas a fatiga del material, con dos tipos diferentes de fabricantes (Memry – Euroflex) obteniendo la grafica característica de esfuerzo – deformación **Fig. 9** de esta grafica se caracterizaron las propiedades mecánicas del NiTi como se observa en la **Tabla 1.** (André Carvalho *et; al* (2016).)

.

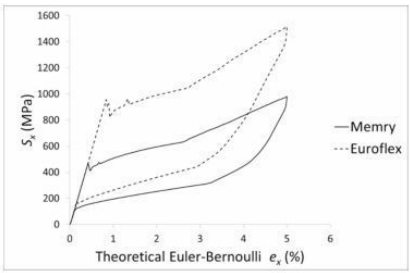


Fig. 9 *grafica esfuerzo vs deformación (NiTi)* (André Carvalho *et; al* (2016).)

Tabla 1. propiedades mecánicas NiTi (André Carvalho *et; al* (2016).)

Elasticidad isotrópica	**valor**	**Magnitud**
Modulo Young´s	70000	Mpa
Relación de poisson´s	0.33	
Superelasticidad		
σMs o SAS	368	Mpa
σMf o FAS	484	Mpa
σAs o SSA	232	Mpa
σAf o FSA	100	Mpa
Épsilon	0.06	mm^-1
Alpha	0	

4.2.2. ARCO DE ORTODONCIA NiTiCu

Las ventajas que presenta las aleaciones de NiTiCu son la reducción en la histéresis de transformación, la capacidad de respuesta y la resistencia a la corrosión en comparación con las aleaciones de NiTi. (Sara Fazelia *et al;* (2016)) Con el fin de determinar las propiedades mecánicas en aleaciones de NiTiCu con un porcentaje de cobre del 5% se cargó cíclicamente el material obteniendo la variación del esfuerzo crítico necesario para producir el efecto superelástico y determinar el esfuerzo de trabajo óptimo en la aleación, como se observa en la gráfica esfuerzo – deformación **Fig. 10,** como resultado NiTiCu cargado en ciclos de (1, 100 y 300 veces) presento una curva de histéresis mas pequeña y una super elasticidad mas estable, en comparación de las aleaciones de NiTi.(F.J. *et al;* (1999)). De la gráfica esfuerzo – deformación con N=300 se caracterizaron las propiedades mecánicas de aleación como se presentan en la **Tabla 2.**

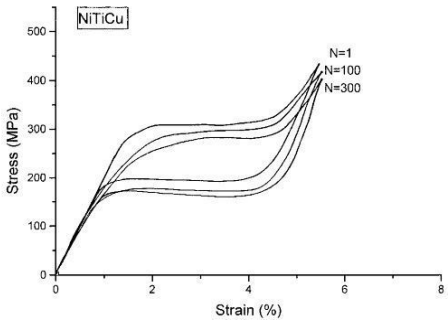


Fig. 10 *grafica esfuerzo vs deformación (NiTiCu)* (F.J. *et al;* (1999))

Tabla 2. Propiedades mecánicas NiTiCu ((F.J. *et al;* (1999)) (Sara Fazelia *et al;* (2016))

Elasticidad isotrópica	**valor**	**Magnitud**
Modulo Young´s	1.32E+05	Mpa
Relación de poisson´s	0.33	
Superelasticidad		
σMs o SAS	216	Mpa
σMf o FAS	299	Mpa
σAs o SSA	180	Mpa
σAf o FSA	165	Mpa
Épsilon	0.069	mm^-1
Alpha	0	

5. MODELO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS

Al obtener el modelo 3D de la (UDA-normal), se procede a llevar el modelo al "desing modeler (ANSYS)", donde se revisa cuidadosamente cada componente que conforma la unidad dentoalveolar, identificando que se hallan exportado correctamente cada uno de los componentes de la (UDA-normal) deben aparecer como sólido y no como superficie.

Una vez obtenido el modelo en el "designmodeler (ANSYS)", se verifica nuevamente cada componente que conforman la unidad dentoalveolar, con el fin de no encontrar sobreposiciones entre cada uno de los componentes o de lo contrario se hace uso de las operaciones booleanas de resta, las cuales permiten tener los componentes de la UDA sin sobreposiciones, **Fig. 11**

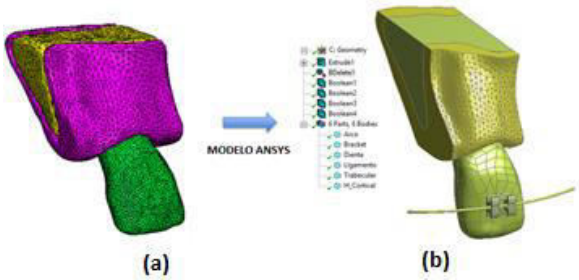


Fig. 11 *(a) modelo 3D (UDA-normal) – (b) modelo 3D (UDA-normal) desing modeler – ANSYS [autor]*

6. CONDICIONES DE FRONTERA

Una vez identificada la oclusión que presenta el incisivo central numero 11 con respecto al incisivo superior número 12, se obtienen los valores de desplazamiento en el espacio que presenta el arco de ortodoncia entre los incisivos número 11 y 12, dejando al incisivo central numero 22 como un punto fijo como se observa en la **Fig.12**. Esto permite obtener un modelo mas aproximado a la realidad e identificando las condiciones de frontera presentes en el modelo.

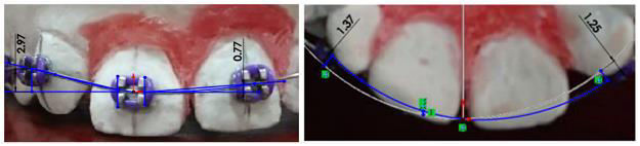


Fig. 12 *Set-up condiciones de frontera incisivo central numero11 [autor]*

6.2. DESPLAZAMIENTO FIJO

Definidas las condiciones de frontera a partir de la oclusión que presenta el incisivo central número 11. se aplica en el modelo 3D de ansys un desplazamiento fijo, el cual permitirá que el modelo no tenga ningún desplazamiento en el espacio como se observa en la **Fig. 13.**

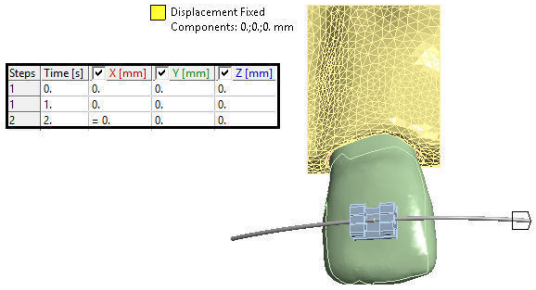


Fig. 13 *Condiciones de frontera desplazamiento fijo- ANSYS [autor]*

6.3. DESPLAZAMIENTO

Definidas las condiciones de frontera a partir de la oclusión que presentan los incisivos número 12 y 11. Se aplica un desplazamiento en la cara opuesta del arco de ortodoncia donde se aplico el desplazamiento fijo, esto permitirá que el arco de ortodoncia realice los desplazamientos dentales en la UDA en las fases de lineación y nivelación como se observa en la **Fig. 14**.

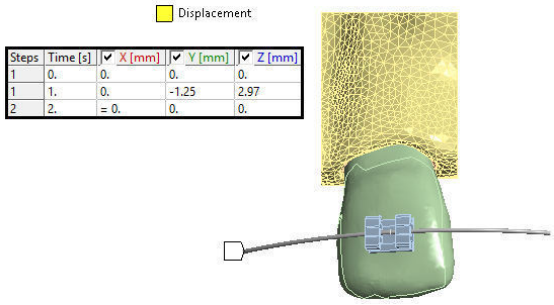


Fig. 14 *Condiciones de frontera desplazamiento fijo- ANSYS [autor]*

RESULTADOS

El análisis de resultados se realizó para el ligamento periodontal, el diente, el hueso trabecular y cortical elementos que constituyen la UDA, y para el bracket. Los resultados de los esfuerzos máximos utilizando arcos de NiTi y NiTiCu. Se muestran en la **Tabla 3**

Tabla 3. Esfuerzos máximos en la UDA y el bracket

	NiTiCu	**NiTi**
Unidad dentoalveolar (UDA)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Esfuerzo máximo (Mpa)
Bracket	148.78	274.45
Diente	0.965	1.135
LPD	0.079	0.092
Hueso cortical	0.539	0.649
Hueso trabecular	0.0176	0.0209

Los esfuerzos más altos se presentaron en el bracket seguido del diente, hueso cortical, LPD y hueso trabecular.

En los resultados obtenidos por elementos finitos del bracket **Fig. 15** se observa una mayor concentración de esfuerzos en la zona de ligado y en la zona interna de las ranuras, tras la aplicación total del desplazamiento generado por el arco de ortodoncia. Donde la mayor concentración de esfuerzos se presenta en el modelo de NiTi en comparación con el NiTiCu, se observa una reducción del esfuerzo máximo entre el modelo de NiTi y el modelo de NiTiCu del 45.78%.

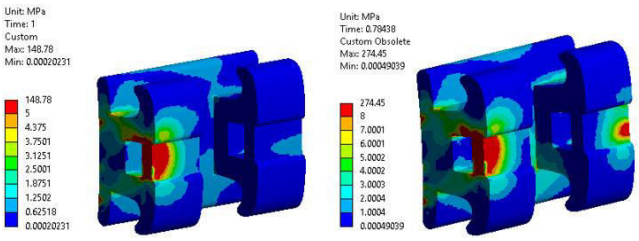


Fig. 15 *Concentración de esfuerzos en bracket (NiTiCu – NiTi) - ANSYS [autor]*

En los resultados obtenidos por elementos finitos del diente **Fig. 16** se observa una mayor concentración de esfuerzos a nivel medio apical por palatino y en la zona coronal a nivel de la aleta distal, tras la aplicación total del desplazamiento generado por el arco de ortodoncia en la UDA. Donde la mayor concentración de esfuerzos se presenta en el modelo de NiTi en comparación con la de NiTiCu, se observa una reducción del esfuerzo máximo entre el modelo de NiTi y el modelo de NiTiCu del 14.97%.

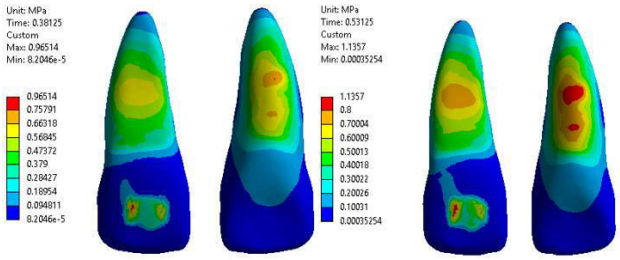


Fig. 16 *Concentración de esfuerzos en el diente (NiTiCu – NiTi) - ANSYS [autor]*

En los resultados obtenidos por elementos finitos del ligamento periodontal **Fig. 17** y **Fig. 18**, se observa una mayor concentración de esfuerzos a nivel cervical y en la zona del ápice, tras la aplicación total del desplazamiento generado por el arco de ortodoncia en la UDA. Donde la mayor concentración de esfuerzos se presenta en el modelo de NiTi en comparación con el NiTiCu, se observa una reducción del esfuerzo máximo entre el modelo de NiTi y el modelo de NiTiCu del 14.13%.

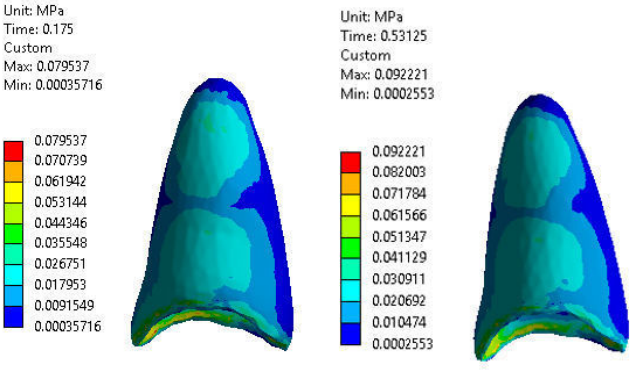


Fig. 17 *Concentración de esfuerzos en ligamento periodontal (NiTiCu – NiTi) - ANSYS [autor]*

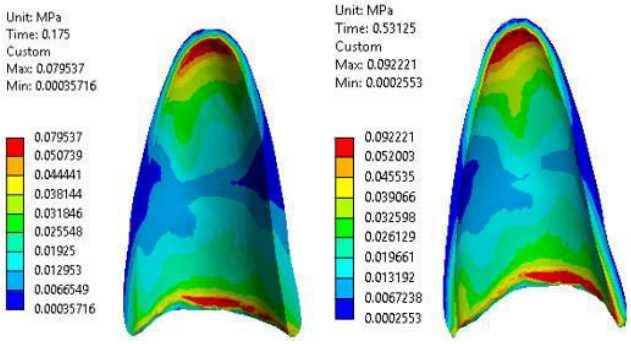


Fig. 18 *Concentración de esfuerzos en ligamento periodontal corte transversal (NiTiCu – NiTi) - ANSYS [autor].*

En los resultados obtenidos por elementos finitos del hueso trabecular **Fig. 19** se observa una mayor concentración de esfuerzos en la cara frontal cerca al límite cervical, tras la aplicación total del desplazamiento generado por el arco de ortodoncia en la UDA. Donde la mayor concentración de esfuerzos se presenta en el modelo de NiTi en comparación con el NiTiCu, se observa una reducción del esfuerzo máximo entre el modelo de NiTi y el modelo de NiTiCu del 15.78 %.

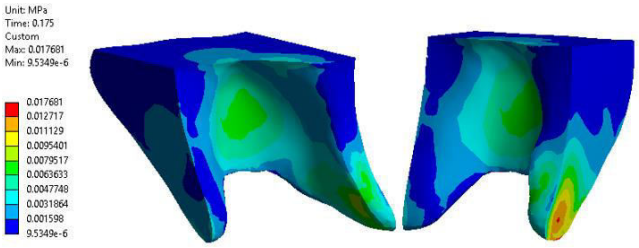


Fig. 19 *Concentración de esfuerzos en el hueso trabecular (NiTiCu) - ANSYS [autor]*

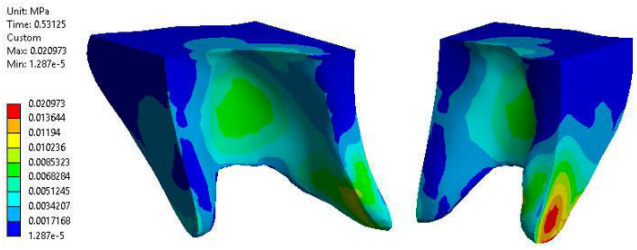


Fig. 19 *Concentración de esfuerzos en el hueso trabecular (NiTi) - ANSYS [autor]*

En los resultados obtenidos por elementos finitos del hueso cortical **Fig. 20** y **Fig. 21**, se observa una mayor concentración de esfuerzos en la parte lateral hacia el mesial tercio coronal, tras la aplicación total del desplazamiento generado por el arco de ortodoncia en la UDA. Donde la mayor concentración de esfuerzos se presenta en el modelo de NiTi en comparación con el NiTiCu, se observa una reducción del esfuerzo máximo entre el modelo de NiTi y el modelo de NiTiCu del 16.94 %.

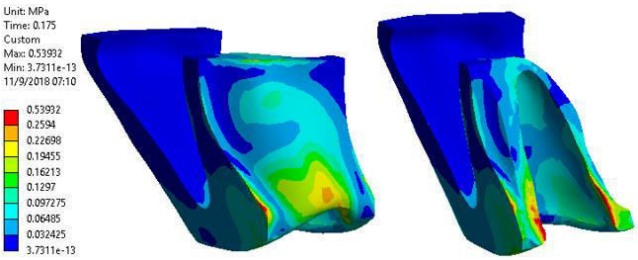


Fig. 20 *Concentración de esfuerzos en el hueso cortical (NiTiCu) - ANSYS [autor]*

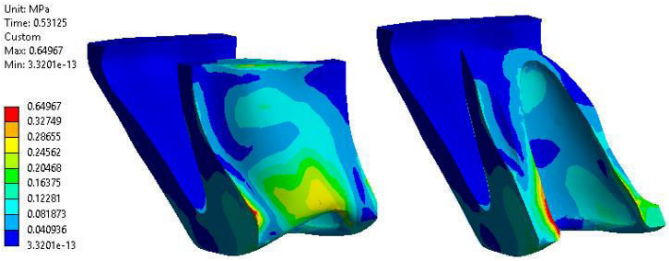


Fig. 21 *Concentración de esfuerzos en el hueso cortical (NiTi) - ANSYS [autor]*

DISCUSIÒN

El primer y principal cambio biomecánico en los dientes cuando hay movimiento ortodóntico está en el ligamento periodontal por la distribución de esfuerzos y tensiones. Una fuerza excesiva en el diente puede provocar hialinización impidiendo que se produzca el movimiento dental, en especial los movimientos intrusivos debido a que estos pueden afectar el paquete vasculonervioso más fácil comparado con otros movimientos. (Liang *et al.*,2009)

Ryniewicz y cols. en el 2016 en un estudio donde simularon la intrusión de un incisivo central superior hallaron que los esfuerzos en el diente fueron de 0.2 MPa, en el ligamento periodontal 0.005 MPa, zona alveolar 0.66 MPa, hueso cortical y trabecular 0.66 MPa. En el bracket encontraron que la mayor distribución de esfuerzos estaba en la aleta superior. (Ryniewicz *et al.,*2016)
Este último resultado es similar al encontrado en el presente estudio donde se evidencia una mayor concentración de esfuerzos en la zona interna de la aleta superior derecha, tras la aplicación total del desplazamiento generado por el arco de ortodoncia.

En estudios realizados por Tooms y Eberhardt en el 2003 refieren que hay un patrón de estrés asimétrico sobre el eje largo de la raíz en el ligamento periodontal en un modelo lineal uniforme en donde mayor esfuerzo en el ligamento periodontal está en el ápice y es más estrecho el esfuerzo en el margen linguocervical que en margen vestíbulo cervical. (Toms y Eberhardt ,2012). Otros estudios corroboran este patrón como el de Fer£eca y cols donde la máxima concentración de esfuerzos en el diente en el la parte inferior apical de 0.3 MPa y en el ligamento periodontal en la parte lingual. (Fer£eca *et al.,*2012)

Parisa en el 2015 simularon 4 modelos encontrando que la mayor concentración estaba cerca al ápice y en palatino, al evaluar por caras el ligamento periodontal en la cara mesial y palatino el mayor esfuerzo estaba en ápice y 1/3 apical, en distal y mesial en 1/3 marginal. (Parisa *et al.,*2015)
Los resultados de dichos trabajos son comparables con los resultados del presente trabajo en la medida en que también se encontró una mayor concentración de esfuerzos a nivel apical, luego de la aplicación total del desplazamiento generado por el arco.
Por otra parte, Phukaoluan et al. En el 2016 afirmaron que La adición de Cu al NiTi afecta varias propiedades, lo que resulta en buena estabilidad térmica, menor histéresis, y altas características de amortiguación, reducción en el límite elástico y la temperatura de inicio de martensita, que las aleaciones NiTi sin Cu, por lo que se corrobora con el estudio actual que para todos los elementos de la UDA y para el bracket hay una mayor concentración de esfuerzos en el modelo de NiTi en comparación con el NiTiCu. (Phukaoluan *et al.,*2016)

CONCLUSIONES

El comportamiento biomecánico de todos los elementos de la unidad dentoalveolar y el bracket muestra que hay una mayor concentración de esfuerzos en el modelo de NiTi, en comparación con el NiTiCu, tras la aplicación total del desplazamiento generado por el arco de ortodoncia en fase de alineación y nivelación utilizando el método de FEA, lo que se traduce en un mayor beneficio clínico para el paciente al obtener fuerzas más contantes y ligeras que no afectaran los tejidos sanos.
Es importante hacer más estudios al respecto.

REFERENCIAS

1. Schemann-miguel F, Cotrim-ferreira F, Streva AM. (2012) "Comparative analysis of load / deflection ratios of conventional and heat-activated rectangular NiTi wires". Dental Press J Orthod; Vol. 17, No.3
2. Bhat FA, Shetty N, Ahmad F, Bhat M, Husain A. (2012)"Comparative Evaluation of Load - deflection Property of Different Brands of Nickel - titanium Archwires". Dent Press J Orthod. Vol. 17, No.3
3. Cossetin E, Hissae S, Nóbrega S, Goretti M, Carvalho F. (2012)"Study of tension in the periodontal ligament using the finite elements method". Dent Press J Orthod. Vol. 17, No.1
4. Baek S, Cha H MY. (2012) "Three-dimensional finite element analysis of the deformation of the human mandible : a preliminary study from the perspective of orthodontic mini- implant stability". Korean J Orthod. Vol. 42, No.4
5. Araújo TM, Fonseca LM, Caldas LD, Costa-Pinto RA. (2012) "Preparation and evaluation of orthodontic setup". Dental Press J Orthod. Vol. 17, No.3
6. Lecce L, Concilio A (2014), shape memory alloy engineering.
7. Liang y cols (2009)" Torque control of the maxillary incisors in lingual and labial orthodontics: A 3-dimensional finite element analysis". Am J Orthod Dentofacial Orthop Vol. 135, No.3
8. Ryniewicz Wojciech y cols. (2016)" Three-dimensional finite element simulation of intrusion of the maxillary central incisor". Biocybernetics and biomedical engineering. Vol. 36

9. Toms S y Eberhardt A. (2003)A nonlinear finite element analysis of the periodontal ligament under orthodontic tooth loading. Am J Orthod Dentofacial Orthop Vol. 123

10. Fer£eca y cols. (2012) "Determination of Stresses and Forces on the Orthodontic System by Using Numerical Simulation of the Finite Elements Method". Acta physica polonica. Vol. 122

11. Parisa S y cols.(2015) "Evaluating Stress Distribution Pattern in Periodontal Ligament of Maxillary Incisors during Intrusion Assessed by the Finite Element Method". J Dent (Shiraz). Vol. 16, No.4

12. Phukaoluan,A.khantachawana, A. Kaewtatip,P. Dechkunakorn ,S. Kajornchaiyakul,J(2016) . "Improvement of mechanical and biological properties of TiNi alloys by addition of Cu and Co to orthodontic archwires". International Orthodontics Vol. 14

13. Leonardo Lecce, Antonio Concilio (2014), shape memory alloy engineering.

14. Kapila S, Sachdeva R. Mechanical properties and clinical applications of orthodontic wires (1989). Am J Orthod Dentofac Orthop. 1989; 96:100–9.

15. Ravichandra Sekhar Kotha1, Rama Krishna Alla, Mohammed Shammas, Rama Krishna Ravi. (2014) An Overview of Orthodontic Wires.

16. Andre Carvalho, Luis Reis, Diogo montalvao, Manuel Fonte (2016). Rotary Fatigue Testing to Determine the Fatigue Life of NiTi alloy Wires: An Experimental and Numerical Analisys.

17. Sara Fazelia, Morteza Vahedpoura *, Sayed Khatiboleslam Sadrnezhaadb (2016) Effect of copper content on tensile mechanical properties of ternary NiTiCu alloy nanowire: Molecular dynamics simulation

18. F.J. Gill; J.A. Planell (1999) Effect of Copper Addition on the Superelastic Behavior of Ni-Ti Shape Memory Alloys for Orthodontic Applications

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN PARA UNA CAPSULA ENDOSCÓPICA

DESIGN OF POSITION CONTROL SYSTEM FOR AN ENDOSCOPIC CAPSULE

M.Sc. Hernando González Acevedo
Ing. Juan Camilo Sabayé Prado

Universidad Autónoma de Bucaramanga
Facultad de Ingeniería, Ingeniería Mecatrónica.
Bucaramanga, Santander, Colombia.
E-mail: hgonzalez7@unab.edu.co
E-mail: jsabaye@unab.edu.co

Resumen: En el artículo se presenta el modelo matemático y el diseño de un sistema de control para mantener la posición y orientación de una cápsula endoscópica, sostenida bajo el principio de levitación magnética. De modo que pueda navegar por todo el sistema digestivo. Se comparan dos técnicas de control diferente, un control proporcional-integral-derivativo (PID) con un control LQR (Regulador Lineal Cuadrático), para lo cual se implementa el modelo dinámico en la herramienta de Simulink y se evalúa la respuesta transitoria del sistema ante diferentes valores de la señal de referencia. A partir de los resultados de la simulación se evalúan los índices de error IAE, ISE, ITAE e ITSE, obteniendo que el control LQR presenta mejor seguimiento de la señal de referencia, menor sobrepaso y tiempo de establecimiento, minimizando a su vez la energía del actuador.

Palabras clave: Capsula endoscópica, modelo dinámico, Control PID, Control LQR.

Abstract: The paper presents the mathematical model and the design of a control system to maintain the position and orientation of an endoscopic capsule, sustained under the principle of magnetic levitation. So that it can navigate the entire digestive system. Two different control techniques are compared, a proportional-integral-derivative controller (PID) and LQR controller (Linear Quadratic Regulator), for which the dynamic model is implemented in the Simulink tool and the transient response of the system is evaluated for different values of the reference signal. Based on the results of the simulation, the performance index IAE, ISE, ITAE and ITSE are evaluated, obtaining that the LQR controller presents better tracking of the reference signal, lower overshoot and lower settling time, while minimizing the energy of the actuator.

Keywords: Endoscope capsule, dynamic model, PID Controller, LQR Controller.

1. INTRODUCCIÓN

Wireless Capsule Endoscope (WCE) es una nueva tecnología de tratamiento médico que hace un gran avance en el diagnóstico de muchas enfermedades del tracto gastrointestinal.

El dispositivo no solo disminuye el sufrimiento causado por un endoscopio tradicional insertado en el tracto digestivo manualmente, sino que también puede alcanzar áreas del intestino delgado [1], [6], [7]. Sin embargo, todavía hay algunos problemas críticos que limitan la posibilidad de su uso en el diagnóstico, tales como problemas de actuación y orientación.

En los últimos años, la idea de utilizar un campo magnético externo para la locomoción de cápsulas ha sido adoptada por muchos investigadores. Sin embargo, tales técnicas se basan en un contacto estrecho con las paredes del intestino y no son aptas para el intestino grueso. Además, estas técnicas sufren problemas de borrosidad en la imagen y la cápsula solo puede ser impulsada hacia adelante y no puede ser dirigida. Por lo tanto, en este documento se propone un nuevo sistema de control magnético de circuito cerrado que puede ser adecuado para inspeccionar el intestino grueso.

El esquema introducido se basa en la levitación magnética en la que un sistema de control de circuito cerrado mantiene una posición fija y una orientación para una cápsula pequeña en relación con 2 o más electroimanes externos. El marco completo se puede mover o rotar para inspeccionar el intestino grueso con 4 grados de libertad (x, y, z y β).

Esto se considera una etapa intermedia hacia el objetivo final de un sistema de actuación magnética 3D completo.

Debido al pequeño tamaño de la cápsula, se supone que en el intestino grueso (donde es posible la inflación) se minimiza el contacto / fricción, lo que simplifica el problema de control. También se supone que la gravedad actuará para mantener el dipolo en el mismo plano que las bobinas (plano xy) en el caso de un sistema de dos bobinas, que el control del movimiento del eje z no es necesario.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN

La única etapa del sistema de actuación 3-DOF propuesto se muestra en la Fig. 1. El esquema consiste en un electroimán controlado que se ensambla utilizando dos bobinas de núcleo de hierro fijadas simétricamente en un marco cartesiano de 4 DOF, un pequeño imán permanente cilíndrico encerrado por una cápsula, cuatro sensores basados en el sensor magnético de efecto Hall que están conectados a los extremos inferior y superior de cada bobina, tubo de intestino simulado 3D, controlador y robot para mover las bobinas.

Los sensores, que se basan en el efecto Hall, se utilizan para proporcionar al controlador información de retroalimentación acerca de la posición de la cápsula que luego se usa para ajustar la corriente del actuador para cumplir con la posición de la cápsula deseada.

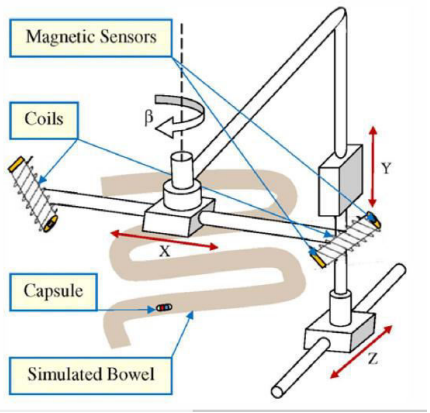


Fig. 1. Plataforma del sistema de control

2.1 Modelo matemático

Un diagrama esquemático del sistema de actuación se muestra en la Fig. 2 [1] y a partir de la geometría del sistema se define la expresión de fuerza magnética entre la bobina y el dipolo la cual es:

$$F = \frac{3\mu_0\mu_r}{4\pi R^5}\left\{(m_c R)m_d + (m_d R)m_c + (m_c m_d)R - \frac{5(m_c R)(m_d R)R}{R^2}\right\} \quad (1)$$

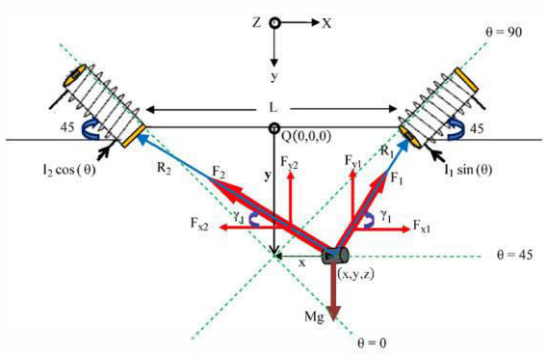


Fig. 2. Diagrama esquemático del sistema de control

Donde los parámetros de la ecuación anterior son: μ_0: permeabilidad magnética del aire (T.m /A), μ_r: permeabilidad magnética relativa del núcleo de hierro de la bobina, m_c: Vector de momento magnético de la bobina (A.m^2), m_d: Vector de momento magnético del imán (A.m^2), R es la distancia del vector entre la bobina y el dipolo (m), donde $m_c = N_c*I*A_c$, $m_d = BV/\mu_0$, N_c es el número de vueltas, I es la corriente de la bobina (A), Ac es la sección transversal área de la bobina (m^2), B es la inducción intrínseca del imán (T) y V es el volumen del dipolo (m^3). La ecuación (1) de fuerza de amplitud se puede aproximar a la ecuación (2), el procedimiento matemático se puede encontrar a partir de [1].

$$F = W\frac{I}{R^4} \tag{2}$$

Donde $W = (3*\mu_r*N_c*A_c*BV)/(2*\pi)$ es una constante de fuerza que depende de la geometría del sistema (N.m^4 / A). El voltaje a través del sensor de efecto Hall inducido por el levitador magnético y la bobina se puede aproximar a [8]:

$$V_s = \alpha I + \frac{\phi}{R^2} + \psi \tag{3}$$

Donde α, ψ, ϕ, son constantes que dependen del sensor de efecto Hall utilizado [1], así como de la geometría del sistema. La confiabilidad del diseño del controlador depende de la robustez de la función de transferencia, y para lograr esto, el modelado del sistema debe basarse en los valores de los parámetros realistas que se enumeran en la Tabla 1. El movimiento de la cápsula en el campo magnético para 2-DOF (dirección X y Y) se puede expresar mediante la segunda ley de Newton.
En la dirección X y Y:

$$M\ddot{x} = F_{x1} - F_{x2} \tag{4}$$

$$M\ddot{y} = Mg - F_{y1} - F_{y2} \tag{5}$$

Donde M es la masa del imán (Kg), g es la aceleración gravitacional (m/s^2), F_{x1} y F_{x2} son la componente x de la fuerza de atracción entre el dipolo y la bobina (1) y (2), respectivamente.

$$F_{xi} = F_i\, cos(\gamma_i),\ i = 1,2 \tag{6}$$

$$F_{yi} = F_i\, sin(\gamma_i),\ i = 1,2 \tag{7}$$

Donde γi es el ángulo de rotación de F_i sobre el eje y. Basado en (2) y (6), (4) se puede escribir como:

$$\ddot{x} = \frac{W_1}{M}\frac{I_1}{{R_1}^4}\cos(\gamma_i) - \frac{W_2}{M}\frac{I_2}{{R_2}^4}\cos(\gamma_2) \tag{8}$$

Donde Wi y Ii son la fuerza constante y la corriente de la bobina (i) respectivamente y Ri es la distancia entre el dipolo y el polo cercano de la bobina (i) para i = 1, 2. Suponiendo que las bobinas tienen los mismos parámetros, es decir, W1 = W2 = W. Para agregar la orientación vertical del dipolo (β), que en equilibrio se espera que sea 45°, al sistema de control, los términos sin(β) y cos(β) se incluyen en I1 e I2 respectivamente. Entonces la ecuación 8 puede reescribirse como [1]:

$$\ddot{x} = \frac{W}{M}\left\{\frac{x_1 I_1 \sin(\beta)}{(x_1^2+y^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{x_2 I_2 \cos(\beta)}{(x_2^2+y^2)^{\frac{5}{2}}}\right\} \tag{9}$$

$$\ddot{y} = g - \frac{W}{M}\left\{\frac{y_1 I_1 \sin(\theta)}{(x_1^2+y^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{y_2 I_2 \cos(\theta)}{(x_2^2+y^2)^{\frac{5}{2}}}\right\} \tag{10}$$

Donde x1 = L/2 - x y x2 = L/2 + x. Para diseñar una estrategia de control lineal, la ecuación dinámica no lineal anterior se linealiza usando la expansión de la serie Taylor sobre un punto de equilibrio definido en [1] (x0, y0, I01, I02). Reemplazando los calores tenemos que x1 = L/2 - x0 y x2 = L/2 + x0. El procedimiento para llegar al modelo lineal puede encontrarse a partir de [1].

$$M * \ddot{x} = Fx1 - Fx2 \quad (11)$$

$$M * \ddot{y} = M * g - Fy1 - Fy2 \quad (12)$$

A partir de las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) se reescriben las ecuaciones en términos de los coeficientes C1, C2, C3, C4, D1, D2, D3 y D4.

$$\ddot{x} = C1 * I1 + C2 * I2 + C3 * x + C4 * y \quad (13)$$

$$\ddot{y} = D1 * I1 + D2 * I2 + D3 * x + D4 * y \quad (14)$$

$$C1 = \left(\frac{W}{M}\right) * \left(\frac{x11 * sin(t)}{(x11^2 + x3^2)^{\frac{5}{2}}}\right) \quad (15)$$

$$C2 = -\left(\frac{W}{M}\right) * \left(\frac{x22 * cos(t)}{(x22^2 + x3^2)^{\frac{5}{2}}}\right) \quad (16)$$

$$C3 = \left(\frac{W}{M}\right) * \left(\left(\frac{(4 * x11^2 - x3^2) * I1 * sin(t)}{(x11^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right) - \left(\frac{(x3^2 - 4 * x11^2) * I2 * cos(t)}{(x22^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right)\right) \quad (17)$$

$$C4 = -5 * \left(\frac{W}{M}\right) * \left(\left(\frac{x11 * x3 * I1 * sin(t)}{(x11^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right) - \left(\frac{x1 * x3 * I1 * cos(t)}{(x22^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right)\right) \quad (18)$$

$$D1 = -\left(\frac{W}{M}\right) * \left(\frac{x3 * sin(t)}{(x11^2 + x3^2)^{\frac{5}{2}}}\right) \quad (19)$$

$$D2 = -\left(\frac{W}{M}\right) * \left(\frac{x3 * cos(t)}{(x22^2 + x3^2)^{\frac{5}{2}}}\right) \quad (20)$$

$$D3 = -5 * \left(\frac{W}{M}\right) * \left(\left(\frac{x11 * x3 * I1 * sin(t)}{(x11^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right) - \left(\frac{x1 * x3 * I2 * cos(t)}{(x22^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right)\right) \quad (21)$$

$$D4 = -\left(\frac{W}{M}\right) * \left(\left(\frac{(4 * x3^2 - x11^2) * I1 * sin(t)}{(x11^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right) - \left(\frac{(x11^2 - 4 * x3^2) * I2 * cos(t)}{(x22^2 + x3^2)^{\frac{7}{2}}}\right)\right) \quad (22)$$

Los puntos de equilibrio se hallaron de las siguientes ecuaciones (23) y (24) [1], los valores se ubican en la Tabla 1.

$$I1 = \left(\frac{M * g}{W * x30}\right) * \left(\frac{x22 + (x11^2 + x30^2)^{\frac{5}{2}}}{sin(t) * (x11 + x22)}\right) \quad (23)$$

$$I2 = \left(\frac{M * g}{W * x30}\right) * \left(\frac{x11 + (x22^2 + x30^2)^{\frac{5}{2}}}{cos(t) * (x11 + x22)}\right) \quad (24)$$

Por medio de la herramienta Simulink de Matlab, se modela el sistema del manipulador con la representación en espacio de estados con el fin de obtener los estados del sistema y determinar la estabilidad, con lo que se obtiene que los estados del sistema son X1 = x, X2 = y, X3 = I1 y X4 = I2.

Tabla 1: Parámetros del modelo matemático

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
L	0.06m	**L_d**	0.012m
N_c	250	**B**	1T
r_n	0.0125m	**μ_r**	200
r_d	0.006m	**μ_0**	4*π*10^-7
M	0.009Kg	**W**	1.98*10^-7
t	π/4	**A_c**	0.00282
I01	0,017A	**C4**	0
I02	0,017A	**D1**	-286,64
C1	343,8	**D2**	-286,64
C2	-343,8	**D3**	0
C3	765.5	**D4**	411,7

2.3 Modelo en espacio de estados

El principio básico del diseño de un sistema de control por espacio de estados es determinar dos matrices de ganancias, K y K_i, la primera que multiplique a los estados del sistema y la segunda al integrador ubicado en el camino directo entre el comparador de error y la planta, tal como se observa en la Figura 3.

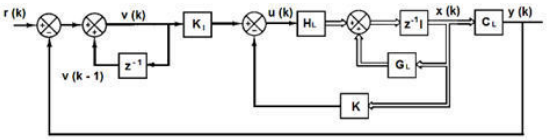


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema de control.

Asumiendo que la entrada de referencia (función escalón) se aplica en t = 0, la dinámica del sistema para t > 0 está descrita por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r(k+1) \quad (25)$$

Donde G_L es la matriz de estados la cual se determina a partir de la matriz exponencial, $G_L = e^{(A_L * T_m)}$, y H_L es la matriz de entrada que se calcula a partir de la relación $H_L = A_L^{(-1)} * (G_L - I) * B$. Considerando que r(k) es una entrada escalón, se tiene que r(k) = r*(k + 1) = r (constante). Cuando k tiende a infinito, la ecuación de estados se define como:

$$\begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} u(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r(\infty) \quad (26)$$

Restando la ecuación (26) de la ecuación (25), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} x_e(k+1) \\ v_e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} u_e(k) \quad (27)$$

donde,

$$x_e(k) = x(k) - x(\infty) \quad (28)$$

$$v_e(k) = v(k) - v(\infty) \quad (29)$$

$$u_e(k) = -\boldsymbol{K} x_e(k) + \boldsymbol{K_I} v_e(k) \quad (30)$$

Definiendo un nuevo vector de estados, ξ(k)

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \quad (31)$$

la dinámica del sistema en lazo cerrado se representa:

$$\xi(k+1) = \widehat{\boldsymbol{G}} \xi(k) + \widehat{\boldsymbol{H}} u_e(k) \quad (32)$$

$$u_e(k) = \widehat{\boldsymbol{K}} \xi(k) \quad (33)$$

donde,

$$\widehat{G} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & 1 \end{bmatrix} \widehat{H} = \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} \quad \widehat{K} = \begin{bmatrix} K & -K_I \end{bmatrix} \quad (34)$$

Para diseñar el controlador MIMO, la dinámica del sistema debe ser formulada en forma de espacio de estados como se muestra en la Figura 3, donde el vector de los estados es $X_{(n*1)} = [x\ \dot{x}\ y\ \dot{y}]^T$ con x e y como las variables a controlar que es la respectiva distancia en x e y, $U_{(m*1)} = [I_1\ I_2]^T$ es el vector de salidas que corresponde a la intensidad de las bobinas. Las matrices que representan el sistema se describen en las ecuaciones (35) hasta (38).

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ C3 & 0 & C4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ D3 & 0 & D4 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ C1 & C2 \\ 0 & 0 \\ D1 & D2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

El sistema es inestable, esto se concluye debido a que algunos de los polos se encuentran en el cuadrante inestable $P_1 = 27.6677$, $P_2 = -27.6677$, $P_3 = 20.2904$, $P_4 = -20.2904$.

3. TÉCNICAS DE CONTROL

3.1 Control PID de dos grados de libertad

El principio básico del esquema del control PID es que actúa sobre la variable a ser manipulada a través de una apropiada combinación de tres acciones de control: acción de control proporcional (donde la acción de control es proporcional a la señal de error actuante, la cual es la diferencia entre la entrada y la señal de realimentación); la acción de control integral (donde la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error actuante) y la acción de control derivativa (donde la acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error actuante).

La estructura de PID de dos grados de libertad como se muestra en la Figura 4, permite utilizar dos controladores en el sistema, los cuales pueden ser diferentes el uno del otro, teniendo variaciones como, por ejemplo: I, P, PD, PI, PID, PID con pseudo, entre otros.

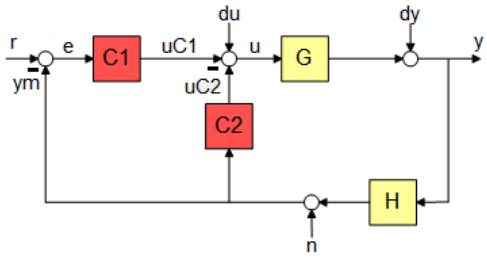


Fig. 4. Diagrama de bloques de un PID de dos grados de libertad. [MATLAB]

La matriz de ganancias relativas determina las funciones de transferencia óptimas a controlar por cada señal de entrada como se muestra en la ecuación (39) lo que para este caso determina que es indiferente cual entrada se seleccione para cada salida porque ambas entradas afectan en igual medida a ambas salidas [9], donde K es la matriz de ganancias relativas.

$$\mathrm{RGA} = \mathrm{K} * \mathrm{inv}(\mathrm{K})^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$K = \begin{bmatrix} \frac{343.8}{-765.5} & \frac{-343.8}{-765.5} \\ \frac{-286.6}{-411.7} & \frac{-286.6}{-411.7} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Se seleccionan las funciones de transferencia G12 y G21 sobre las cuales se implementa un control PID de dos grados de libertad.

$$G12 = -\frac{343.8}{s^2 - 765.5} \quad (41)$$

$$G21 = -\frac{-286.6}{s^2 - 411.7} \quad (42)$$

Las funciones de transferencia de los controladores para el eje X fue de un I-PD con el que se obtuvo un tiempo de establecimiento de 0.388 con un sobrepaso de 1.82%.

$$C1_I = \frac{-7.1301e5}{s} \quad (43)$$

$$C1_PD = -4.9976e8 * \frac{s + 14.84}{s + 6.233e4} \quad (44)$$

Para el eje Y se obtuvo un controlador PID con pseudo el cual presenta las mismas caracteristicas que un PID ideal, pero con la unica diferencia de que se añade un polo con la finalidad de hacer que la ecuacion tenga igual orden en el numerador como en el denominador lo que permite hacerle transformada en Z y cumpla con el principio de causalidad. Este presentó un tiempo de establecimiento de 0.228 segundos con un sobrepaso del 61.3%.

$$C2_PID = -37.40 * \frac{(s + 17.71) * (s + 9.037)}{s(s + 200)} \quad (45)$$

3.2 Control LQR

El controlador LQR es la combinación de una ganancia de realimentación de estados y un estimador de estados, tipo Kalman [3]. El primer paso para el diseño del controlador LQR es determinar una matriz de ganancias K. Las matrices Q y R son matrices definidas positivas, generalmente diagonales, que determinan el equilibrio entre el seguimiento de una trayectoria por parte de los estados y la energía de la señal de control requerida por el sistema para alcanzar los objetivos de control deseados. La matriz K se determina resolviendo la ecuación matricial de Riccatti, dadas las matrices G, H, Q y R.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 765.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 411.7 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 343.8 & -343.8 \\ 0 & 0 \\ -286.64 & -286.64 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$Q = diag([1,1,0.013,0.019,1000000,100000]) \quad (48)$$

$$R = diag([0.013,0.011]) \quad (49)$$

Al solucionar la ecuación de Riccatti, se obtiene la matriz K que se subdivide en dos matrices K_{est} y K_I que se pueden observar en la Figura 5, donde las primeras cuatro columnas corresponden a los cuatro estados del sistema y representan la matriz K_{est} y las demás columnas corresponden al número de integradores del sistema que se representan en la matriz K_I.

$$\hat{K} = 1.0e^3 \begin{bmatrix} 0.2708 & 0.0061 & -0.0644 & -0.0010 & -5.9954 & 2.0243 \\ -0.3139 & -0.0070 & -0.0655 & -0.0010 & 6.9591 & 2.0611 \end{bmatrix} \quad (50)$$

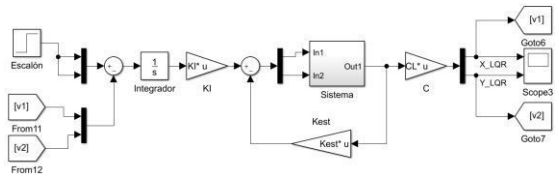


Fig. 5. Diagrama de bloques del sistema con LQR. [Simulink]

4. RESULTADOS

Cuando se diseña un sistema de control para un proceso físico, se debe seleccionar uno o más parámetros para elegir el mejor rendimiento. Para este propósito, se usa una medida conocida como índices de error. Los tres criterios según Graham y Lathrop son: confiabilidad, aplicabilidad, y selectividad [4]. Los índices de error que se tomaron en cuenta fueron: integral del error absoluto (IAE), integral del error cuadrático (ISE), integral del tiempo por el error absoluto (ITAE) e integral del tiempo por el error cuadrático (ITSE), definidos por las ecuaciones 51 a 54, donde e(k) es el vector del error y t(k) el vector de tiempo [5].

$$ISE = \sum_{k=0}^{\infty} e(k)^2 \quad (51)$$

$$ITSE = \sum_{k=0}^{\infty} t(k)e(k)^2 \quad (52)$$

$$IAE = \sum_{k=0}^{\infty} |e(k)|^2 \quad (53)$$

$$ITAE = \sum_{k=0}^{\infty} t(k)|e(k)| \quad (54)$$

Se simuló la respuesta transitoria de los dos controladores y el modelo no lineal frente a una entrada escalón y se estima los cuatro índices de error. En la Tabla 2 se observan los resultados de los cuatro índices, IAE, ISE, ITAE e ITSE, [5] se destaca que el sistema, el control LQR presenta los menores valores, por tanto, es mejor.

Tabla 2: Resultado de los cuatro índices de error

Variable		IAE	ITAE	ISE	ITSE
Control PID	X	0.0381 8	0.055 3	0.0023 78	0.004 064
	Y	0.0134 3	0.020 38	0.0002 999	0.000 511
Control LQR	X	0.0111	0.007 716	0.0048 33	0.003 265
	Y	0.0077 16	0.003 265	0.0004 873	0.000 2459

Como se observa en las Figuras 6 y 7, se hace una simulación del modelo no lineal ante una entrada escalón de 0.1 para comparar las respuestas transitorias de las variables de control x e y en cada técnica y en las Figuras 8 y 9 se observan las respuestas ante entrada de setpoint variable.

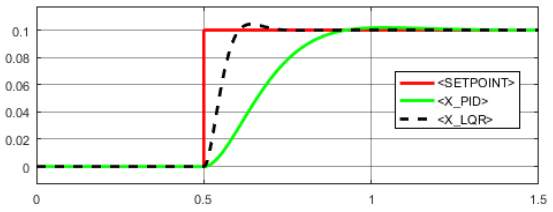


Fig. 6. Respuesta del eje x ante entrada escalón del sistema con control PID y LQR.

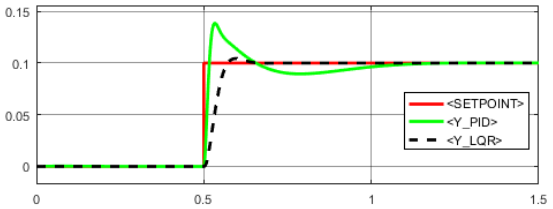


Fig. 7. Respuesta del eje y ante entrada escalón del sistema con control PID y LQR.

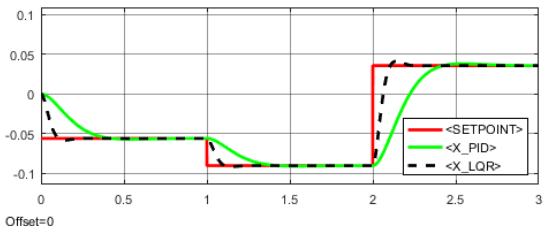


Fig. 8. Respuesta del eje x ante setpoint variable del sistema con control PID y LQR.

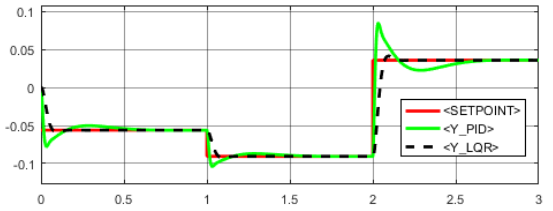


Fig. 9. Respuesta del eje y ante setpoint variable del sistema con control PID y LQR.

5. CONCLUSIONES

En este artículo, se ha propuesto un nuevo sistema de actuación para mover una cápsula en el estómago y el intestino grueso. El esquema propuesto, se basa en la levitación magnética controlada, está diseñado para mantener una posición deseada del imán incrustado con relación al marco del electroimán móvil (bobinas). Los resultados de simulación del sistema de actuación propuesto, mostraron que se puede lograr una respuesta rápida y un error de estado estable mínimo basados en entradas de control pequeñas usando las técnicas LQR y PID. Dentro de las técnicas de control se selecciona LQR como la mejor estrategia ya es mejor en cuanto a tiempo de establecimiento con una acción de control reducida y no presenta sobrepasos que pueden hacer que la píldora oscile dentro del sistema digestivo. Se debe evitar cualquier contacto posible para no alterar las paredes intestinales.

REFERENCIAS

[1] Mohammed *et al*., (2011). "Novel MIMO 4-DOF Position Control for Capsule Endoscope". pp. 1-4.

[2] Ogata K., (2000), "Sistema de control en tiempos discretos", México: Prentice Hall Hispanoamérica, S.A.

[3] Burns R., (2001), "Advanced Control Engineering," Ed. Butterworth Heinemann. ISBN 0750651008, p. 288 – 299.

[4] D. G. a. R. C. Lathrop, (1953), "The Synthesis of "Optimum" Transient response: Criteria and Standard Forms," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers.

[5] R. B. P. C. Padraig Basquel, (2017), "Optimal closed-loop transfer functions for non-standard performance indices," in 2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC), Killarney.

[6] Tai *et al.,* (2007). "Study of magnetic levitation technique for use in a wireless capsule endoscope". Journal of medical and biological engineering, 27(2): 57-64.

[7] Carpi *et al*., (2007). "Controlled navigation of endoscopic capsules: Concept and preliminary experimental investigations. IEEE transactions on biomedical engineering, vol. 54, no. 11.

[8] Smaili A. and Mrad F., (2008). "Applied Mechatronics", MA: Oxford.

[9] Häggblom K., (1997). "Control structure selection via relative gain analysis of partially controlled systems". European Control Conference (ECC).

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO PARA UN MANIPULADOR PLANAR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

DESIGN OF ADVANCED CONTROL STRATEGIES FOR A PLANAR MANIPULATOR OF TWO DEGREES OF FREEDOM

MSc. Hernando Gonzales Acevedo.
Daniel Felipe Rincón Ovalle.

[*] **Universidad Autónoma de Bucaramanga,**
Facultad de ingeniería, Programa de Ingeniería Mecatrónica.
Bucaramanga, Santander, Colombia.
E-mail: hgonzales7@unab.edu.co, drincon204@unab.edu.co.

.

Resumen: Se plantea el modelo matemático de un manipulador planar de dos grados de libertad (2DOF), el cual consta de dos eslabones que rotan en el eje Z, accionados por motores DC con el propósito de generar trayectorias para diversos aplicativos, desde posicionamiento de objetos hasta escritura. para ello se utilizó la herramienta MATLAB y SIMULINK para diseñar tres estrategias de control, primero se implementó un control PID, el cual consiste en tres parámetros distintos, un valor proporcional que depende del error actual, uno integral que depende del error pasados y uno derivativo que es una predicción del error futuro, luego se implementó un control compuesto por un filtro de Luenberger y un controlador LQR desacoplado, el cual busca estimar los estados que no se pueden medir en un sistema a partir de una matemática propia, por último se implementó un control QFT el cual se basa en la relación que existe entre la retroalimentación, la incertidumbre, las perturbaciones no medibles, y la presencia de polos o ceros en la parte real positiva. Los resultados finales sugieren que la mejor estrategia de control es el PID pues asegura los mejores rangos de movimiento para el sistema.

Palabras clave: manipulador, modelo matemático, controlador PID 2DOF, controlador LQG, Controlador robusto

Abstract: The mathematical model of a planar manipulator of two degrees of freedom (2DOF) is proposed, which consists of two links that rotate in Z axis, powered by a DC motors with the purpose of generating trajectories for diverse applications, from positioning of objects to writing. For that purpose, the MATLAB and SIMULINK tool was used to design three control strategies, first a PID control was implemented, which consists of three different parameters, a proportional value that depends on the current error, an integral one that depends on the past error and a derivative one which is a prediction of the future error, then an control composed of a Luenberger filter and a decoupled LQR controller was implemented, which seeks to estimate the states that can't be measured in a system from its own math, finally implemented a QFT control which is based on the relationship between feedback, uncertainty, non-measurable perturbations, and the presence of poles or zeros in the positive real part. The results suggest that the best control strategy is the PID because it ensures the best ranges of movement for the system.

Keywords: manipulator, dynamics model, PID 2DOF controller, LQG controller, robust controller

1. INTRODUCCIÓN

Los manipuladores robóticos se utilizan en diferentes aplicaciones, desde industrias de fabricación, automotrices y médicas. Estos sistemas robóticos usualmente están trabajando en circunstancias peligrosas, impredecibles o inhóspitas, donde el ser humano no puede trabajar con facilidad. Desde el punto de vista mecánico, los manipuladores robóticos son conjuntos de enlaces en serie o paralelos que se conectan con la ayuda de juntas revolucionarias y /o prismáticas entre la base y el marco del efector final. Entre estos sistemas encontramos diferentes combinaciones, las cuales se diferencian entre sí por los grados de libertad que poseen o por el tipo de articulación que la componen.

Para tareas de desplazamiento o ubicación espacial de componentes, una de las configuraciones más sencillas de manipulador robótico es un sistema de dos grados de libertad, compuesto por juntas revolucionarias y dos eslabones que se mueven en el plano X, Y, y rotan en el eje Z, este tipo de manipuladores robóticos permiten automatizar procesos sencillos en los que se debe mover un objeto de un lugar a otro sin necesidad de la intervención del hombre, para ello se implementa al sistema mecánico una estrategia de control que permita conocer y retroalimentar la posición del sistema sin entrar en contacto con el proceso en el que el robot actúa.

Entre las estrategias de control que se implementan, se encuentran controladores PID como es el caso de (Mandava, R, K. Vundavalli, P, R. 2015) quienes modelan matemáticamente un brazo articulado de 4 grados de libertad y diseñan controladores PID para testear el funcionamiento del brazo en una simulación para verificar el desempeño de los controladores, o en el trabajo de (D. Muro-Maldonado, A. Rodriguez-Angeles, C.A. Cruz-Villar. 2007) donde realizan simulaciones CAD/CAM para verificar la validez de controladores PID creados para un manipulador planar de 2DOF desde lo teórico hacía lo experimental, también se usan controladores LQR, y en algunos casos controladores robustos como el QFT, con técnicas como el LPV con reducción de parámetros como lo hacen (Kwiatkowski, A. Werner, H. 2005) los cuales implementan una reducción de parámetros en un modelo de control LPV o variación linear de parámetros el cual consiste en la aproximación de las ganancias del controlador para una zona de operación del sistema, o el caso de (R. Cord&, E. Sanz, P. Vega. 1998) los cuales diseñan controladores para un manipulador planar de dos grados de libertad mediante una aproximación matemática de las constantes que conforman las funciones de control del sistema. Estas técnicas de control además de permitir el monitoreo de la posición del efector final del robot permiten limitar los procesos del sistema acotando el movimiento del manipulador y permitiendo un mayor control en los procesos en los que se implementa.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL MANIPULADOR PLANAR DE 2 GRADOS DE LIBERTAD (2DOF)

2.1 Dinámica de un manipulador planar de dos grados de libertad

La dinámica de un manipulador como el que se muestra en la figura 1 se determina utilizando el método de Lagrange aplicado a dos barras rectangulares homogéneas con masa y momento de inercia tensor relacionado al centro de masa de cada barra (Murray, 1994).

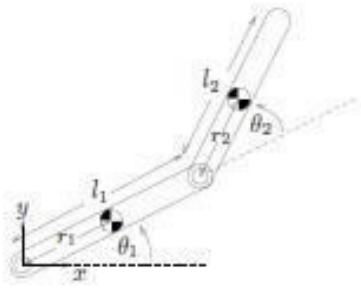


Fig.1. manipulador planar de dos eslabones (Murray, 1994)

La energía cinética del manipulador está dada por:

$$T(\theta,\dot{\theta}) = \frac{1}{2}m_1\|v_1\|^2 + {\omega_1}^T l_1 \omega_1 + \frac{1}{2}m_2\|v_2\|^2 + {\omega_2}^T l_2 \omega_2 \quad (1)$$

Ya que el modelo del manipulador está restringido a el plano x/y las magnitudes de las velocidades de cada barra están dadas por $\|\omega 1\| = \dot{\theta}_1$ y $\|\omega 2\| = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2$ ahora se resuelve la energía cinética en términos de la cinemática del mecanismo, la cual está dada por:

Cinemática:

$$x_1 = r_1 * \cos(\theta_1) \tag{2}$$

$$y_1 = r_1 * \sin(\theta_1) \tag{3}$$

$$x_2 = l_1 * \cos(\theta_1) + r_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{4}$$

$$y_2 = l_1 * \sin(\theta_1) + r_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{5}$$

$$\dot{x}_1 = -r_1 * \sin(\theta_1) * \dot{\theta}_1 \tag{6}$$

$$\dot{y}_1 = r_1 * \cos(\theta_1) * \dot{\theta}_1 \tag{7}$$

$$\ddot{x}_1 = -(l_1 * \sin(\theta_1) + r_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2)) * \dot{\theta}_1 - r_2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) * \dot{\theta}_2 \tag{8}$$

$$\ddot{y}_1 = -(l_1 * \cos(\theta_1) + r_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2)) * \dot{\theta}_1 - r_2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) * \dot{\theta}_2 \tag{9}$$

Ahora se hace la relación de las velocidades descritas en la ecuación de la energía cinética del sistema con la cinemática del mecanismo las cuales estarían dadas por $v_1 = \dot{x_1}^2 + \dot{y_1}^2$ y $v_2 = \dot{x_2}^2 + \dot{y_2}^2$. Reemplazando en la ecuación de la energía cinética del manipulador la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &T(\theta, \dot{\theta}) \\ &= \frac{1}{2} m_1 (\dot{x_1}^2 + \dot{y_1}^2) + \frac{1}{2} I_{z1} \dot{\theta_1}^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x_2}^2 + \dot{y_2}^2) \\ &+ \frac{1}{2} I_{z2} \left(\dot{\theta_1}^2 + \dot{\theta_2}^2\right) \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha + 2\beta cos(\theta 2) & \delta + \beta cos(\theta 2) \\ \delta + \beta cos(\theta 2) & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{10}$$

Donde:

$$\alpha = I_{z1} + I_{z2} + m_2 r_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_2^2) \tag{11}$$

$$\beta = m_1 l_1 r_2 \tag{12}$$

$$\delta = I_{z2} + m_2 r_2^2 \tag{13}$$

Finalmente, para el sistema el lagrangiano que se plantea desprecia los términos de la energía potencial pues esta actúa uniformemente en todo el mecanismo por lo cual se obtiene la forma L = T y esto se sustituye en la ecuación de Lagrange para obtener las ecuaciones que modelan los torques de entrada del sistema.

$$\begin{bmatrix} \alpha + 2\beta \cos(\theta 2) & \delta + \beta \cos(\theta 2) \\ \delta + \beta \cos(\theta 2) & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\beta sen(\theta 2)\dot{\theta}_2 & -\beta sen(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ \beta sen(\theta 2)\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} \tag{14}$$

El primer término de esta ecuación representa las fuerzas inerciales del sistema, el segundo las fuerzas de Coriolis y centrifugas y al lado derecho del igual están los torques aplicados.

Los valores de las constantes utilizados en el modelo matemático se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del modelo matemático

Parámetro	Valor numérico	
	Valor	Unidades
m1	0,1803	[Kg]
m2	0,1904	[Kg]
l1	0,2	[m]
l2	0,2	[m]
r1	0.1	[m]
r2	0,1	[m]
Iz1	0,00063870417	[Kg*m^2]
Iz2	0,00067415625	[Kg*m^2]

2.2. Representación en espacio de estados del sistema

Para la implementación de las estrategias de control en el modelo matemático se tuvieron en cuenta los siguientes estados y puntos de equilibrio para linealizar el modelo por el método de Taylor:

Los estados del sistema están dados por $\theta_1 = x_1$, $\dot{\theta}_1 = x_2$, $\theta_2 = x_3$ y $\dot{\theta}_2 = x_4$ y los puntos de equilibrio son $x_{10} = 0$, $x_{20} = 0$, $x_{30} = pi/2$ y $x_{40} = 0$ y los valores para las condiciones iniciales de torques son los siguientes, $t_{10} = 0$ y $t_{20} = 0$, ya con los valores de condiciones iniciales y puntos de equilibrio se aplica la linealización de Taylor y se obtiene la siguiente representación en espacio de estados:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 99.44 & -99.44 \\ 0 & 0 \\ -99.44 & 487.4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3. TÉCNICAS DE CONTROL

3.1. Controlador PID.

Se diseña un control PID de dos grados de libertad. Este método de control se rige por el diagrama de bloques de la Figura 2 donde se implementan dos controladores que convergen en un restador para generar una función U(s) que pasa a ser la entrada a la planta.

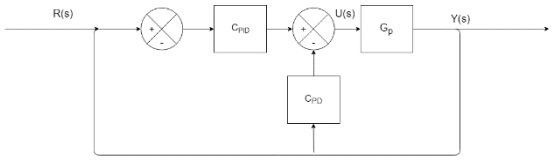


Fig.2. Diagrama de bloques de un controlador de dos grados de libertad

El diseño de los controladores se hace por medio de la técnica de ubicación de polos en la herramienta SIMULINK de Matlab y se obtienen los siguientes diseños de controlador para las salidas θ_1 y θ_2. las funciones de transferencia obtenidas para cada controlador fueron discretizadas bajo un $T_m = 0.025$:

Controladores para la salida θ_1:

$$C1_{PID} = \frac{0.01*z^2-0.005588*z+0.0007806}{z^2-1.1*z+0.1} \quad (19)$$

$$C1_{PD} = \frac{2.75*-+2.53}{z-0.1} \quad (20)$$

Controladores para la salida θ_2:

$$C2_{PID} = \frac{0.01*z^2-0.0056*z+0.000784}{z^2-1.1*z+0.1} \quad (21)$$

$$C2_{PD} = \frac{3.09*-+2.843}{z-0.1} \quad (22)$$

3.2. Representación en espacio de estados en lazo cerrado de un sistema de control

El principio básico del diseño de un sistema de control por espacio de estados es determinar dos matrices de ganancias, K y K_i, la primera que multiplique a los estados del sistema y la segunda al integrador ubicado en el camino directo entre el comparador de error y la planta, tal como se observa en la figura 3.

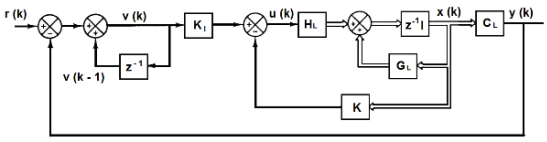


Fig. 3. Diagrama de bloques del sistema de seguimiento

Asumiendo que la entrada de referencia (función escalón) se aplica en $t = 0$, la dinámica del sistema para $t > 0$ esta descrita por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r(k+1) \quad (23)$$

donde G_L es la matriz de estados, representada en tiempo discreto, la cual se determina a partir de la matriz exponencial, $G_L = e^{A_L T_m}$, y H_L es la matriz de entrada, representada en tiempo discreto, que se calcula a partir de la relación $H_L = {A_L}^{-1}(G_L - I)B$. Considerando que $r(k)$ es una entrada escalón, se tiene que $r(k) = r(k+1) = r$ (constante). Cuando k tiende a infinito, la ecuación de estados se define como:

$$\begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} u(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r(\infty) \quad (24)$$

Restando la ecuación 23 de la ecuación 24, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} x_e(k+1) \\ v_e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} u_e(k) \quad (25)$$

donde,

$$x_e(k) = x(k) - x(\infty) \quad (26)$$

$$v_e(k) = v(k) - v(\infty) \quad (27)$$

$$u_e(k) = -\boldsymbol{K} x_e(k) + \boldsymbol{K_I} v_e(k) \quad (28)$$

Definiendo un nuevo vector de estados, $\xi(k)$

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \quad (29)$$

la dinámica del sistema en lazo cerrado se representa:

$$\xi(k+1) = \widehat{\boldsymbol{G}}\xi(k) + \widehat{\boldsymbol{H}} u_e(k) \quad (30)$$

$$u_e(k) = \widehat{\boldsymbol{K}}\xi(k) \quad (31)$$

donde,

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ -C_L G_L & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} H_L \\ -C_L H_L \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\hat{K} = [K \quad -K_I] \quad (34)$$

3.3. Controlador LQR con observador de Luenberger.

El método que se implementó en este trabajo fue un controlador compuesto por un filtro de Luenberger y el controlador LQR desacoplados, El primer paso para el diseño del controlador compuesto es diseñar el control por LQR para ello se determina una matriz de ganancias $\hat{K}$ que minimice la función de costo J, ecuación 35. Las matrices Q y R son matrices definidas positivas, generalmente diagonales, que determinan el equilibrio entre el seguimiento de una trayectoria por parte de los estados y la energía de la señal control requerida por el sistema para alcanzar los objetivos de control deseados. La matriz $\hat{K}$ se determina resolviendo la ecuación matricial de Riccatti, dadas las matrices $\hat{G}$, $\hat{H}$, Q y R.

$$J = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{\infty}(\xi^T Q \xi + {u_e}^T R u_e) \quad (35)$$

Las matrices obtenidas para el diseño del controlador LQR fueron las siguientes:

Matriz Q:

$$\mathrm{Q} = \mathrm{diag}([10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10]) \quad (36)$$

Matriz R:

$$R = \mathrm{diag}([100 \quad 100]) \quad (37)$$

La matriz de ganancias que se obtuvo al diseñar el controlador fue:

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} 0.474 & 0.138 & 0.051 & 0.018 & -0.014 & -0.001 \\ 0.051 & 0.018 & 0.269 & 0.065 & -0.001 & -0.009 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Polos en Lazo cerrado:

$$E = \begin{bmatrix} 0.3008 + 0.0000i \\ 0.8447 + 0.0000i \\ 0.9373 + 0.0243i \\ 0.9373 - 0.0243i \\ 0.9410 + 0.0217i \\ 0.9410 - 0.0217i \end{bmatrix} \quad (39)$$

El siguiente paso luego de diseñar el controlador es diseñar el observador, en este caso se trabajó con la teoría del observador de Luenberger, el cual se modela bajo las ecuaciones 40 y 41 donde $K(\hat{x})$ es la ganancia del observador, para el diseño de este se selecciona una $K(\hat{x})$ para lograr que la dinámica del error sea asintóticamente estable. Normalmente se realiza un diseño mediante ubicación de polos (Botero Castro, H, C. Álvarez Zapata, H, D 2008).

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + K(\hat{x})(y - \hat{y}) \quad (40)$$

$$\hat{y} = h(\hat{x}) \quad (41)$$

Conocidas las varianzas del ruido de estas dos señales, Q_n y R_n , se determina un vector de ganancias L que minimiza el error en la estimación, $x - \hat{x}$, utilizando la ecuación de Riccatti. Ecuación 42:

$$\hat{x}(k+1) = G_L\hat{x}(k) + H_L u(k) + L(y(k) - C_L\hat{x}(k)) \quad (42)$$

Donde $u(k)$ es la señal de control y $y(k)$ la variable a controlar del proceso. Para el diseño bajo criterio de ubicación de polos se genera una diagonal de polos en continua con los polos mostrados en la ecuación 43, los polos se seleccionan bajo un criterio dado por el tiempo de establecimiento que se desea para el sistema, en este caso $Ts = 0.4$.

$$Pc = [-10, -40, -50, -60\,] \quad (43)$$

Luego se discretizan esos polos bajo un periodo de muestreo de $T_m = 0.025$ ecuación 44 y se halla la

matriz X ecuación 47 a partir de la ecuación del Sylvester ecuación 45 para ello se define la matriz G ecuación 46 para resolver la ecuación de Sylvester:

$$Pd = 0.7788 \quad 0.3679 \quad 0.2865 \quad 0.2231 \tag{44}$$

$$A^T X - X\Lambda - C^T G = 0 \tag{45}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.9150 & -0.6848 & 0.9143 & 0.606 \\ 0.9298 & 0.9412 & -0.0292 & -0.7162 \end{bmatrix} \tag{46}$$

$$X = \begin{bmatrix} 2.845 & -1.18 & 0.371 & -0.57 \\ -0.321 & 0.046 & -0.013 & 0.018 \\ 3.669 & 1.307 & -1.128 & 0.1207 \\ -0.414 & -0.051 & 0.039 & -0.004 \end{bmatrix} \tag{47}$$

Por ultimo se halla la matriz L ecuación 49 a partir de la ecuación 48:

$$L = G * inv(X) \tag{48}$$

$$L = \begin{bmatrix} 1.139 & -0.264 \\ 12.175 & -7.553 \\ -0.213 & 1.203 \\ -5.867 & 13.825 \end{bmatrix} \tag{49}$$

3.3. Control Robusto Cuantitativo QFT.

La teoría del control de retroalimentación cuantitativa (QFT) es un método de ingeniería de control que propone explícitamente el uso de la realimentación para reducir simultáneamente los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas. El método se fundamenta en el control propuesto por (Bode, 1945), cuando existe incertidumbre en el modelo de la planta o cuando hay perturbaciones no medidas actuando sobre la misma, presentado una estructura como se observa en la figura 4, donde la salida está dada por la ecuación (46).

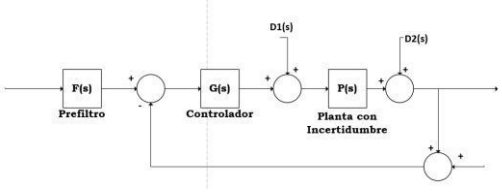


Fig 4. Estructura genérica de control QFT

$$Y = \frac{P}{1 + P * G} * D_1 + \frac{1}{1 + P * G} * D_2 + \frac{P * G}{1 + P * G} * (F * R - N) \tag{50}$$

Se puede expresar la estabilidad robusta del controlador como:

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \delta_U, Para\ toda\ P \in \wp, \omega_{iU} \in [0, \infty] \tag{51}$$

siendo $L = G \cdot P$ y δ_u una tolerancia constante para todas las frecuencias. El controlador G será el responsable de adecuar la sensibilidad de lazo cerrado debida a variaciones en $|P|$, a la tolerancia δ_u, en cada una de las frecuencias discretas ω_{iU}. La estabilidad debe garantizarse en el intervalo global de frecuencias de trabajo del sistema. El cumplimiento de la desigualdad en la ecuación 50 impone un máximo sobre impulso en la respuesta temporal y frecuencial del sistema en lazo cerrado, esto equivale a imponer un valor mínimo en el coeficiente de amortiguamiento de los polos dominantes en lazo cerrado. Al mismo tiempo, garantiza unos márgenes de fase y ganancia mínimos para todas las plantas $P \in \wp$, índices con los que el control clásico mide el grado de estabilidad de un sistema. Dichos márgenes pueden calcularse de forma simple a partir de la tolerancia δ_u como sigue (Y. a. O. Y. Chait, 1993):

$$MF \geq 180° - \arccos\left(\frac{0.5}{\delta_U{}^2} - 1\right) \tag{52}$$

$$MG \geq 1 + \frac{1}{\delta_U} \tag{53}$$

Como criterio general de diseño para obtener una estabilidad relativa aceptable, (B. G,1988) aconseja unos márgenes mínimos de fase y ganancia de 45º y 1.77 (o $5dB$), respectivamente. Aplicando las ecuaciones 52 y 53 resulta un mínimo $\delta_u = 1.1$ en términos de QFT. Este criterio fue tomado para el diseño del controlador. El diseño del controlador QFT, $G(s)$, se lleva a cabo sobre el diagrama de Nichols en el que se han representado los contornos para cada ωi, $B(j\omega_i)$, y la planta nominal $P_0(j\omega_i)$. Los contornos expresan la mínima posición a alcanzar por la planta nominal de lazo abierto para cumplir las especificaciones de lazo cerrado que ya incluyen la incertidumbre. De este modo, con la técnica de síntesis o loop-shaping se añaden elementos ganancia, polos y ceros tal que la planta nominal de cada frecuencia satisfaga su correspondiente contorno, (se sitúe por encima o por debajo, según especificaciones). Esto garantizará que ninguna planta P en $\{P\}$ de las previstas en el modelado violará las especificaciones planteadas. A partir de lo anterior se diseñó un controlador $G(s)$

Con un criterio de diseño por seguimiento a la referencia, se diseñan dos funciones G_{up} ecuación 54 la cual limita en la parte superior la respuesta transitoria y G_{low} Ecuación 55 la cual limita en la parte inferior la respuesta transitoria:

$$G_{up} = \frac{5.375}{s^2 + 3.2\,s + 5.375} \quad (54)$$

$$G_{low} = \frac{1.143}{s + 1.143} \quad (55)$$

A partir de estos criterios se obtiene el controlador y filtro diseñado para cada planta del sistema. El filtro de la planta 1 y el controlador se muestran en las ecuaciones 56 y 57:

$$F_{11} = \frac{1}{0.55 * s + 1} \quad (56)$$

$$C_{11} = \frac{0.06 * s + 0.0046}{0.0015 * s + 1} \quad (57)$$

El filtro de la planta 1 y el controlador se muestran en las ecuaciones 58 y 59:

$$F_{22} = \frac{1}{0.55 * s + 1} \quad (58)$$

$$C_{22} = \frac{0.06 * s + 0.0046}{0.0015 * s + 1} \quad (59)$$

4. RESULTADOS

4.1. Resultados simulación en MATLAB Y SIMULINK

Controlador PID:

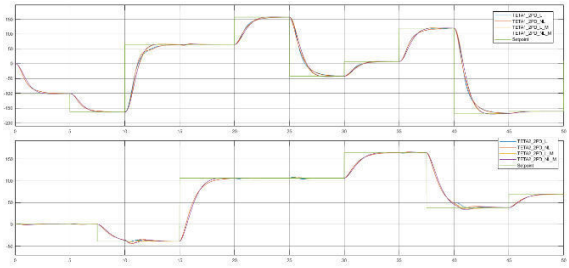


Fig.5. Respuesta transitoria de las variables θ_1 y θ_2

Controlador LQG:

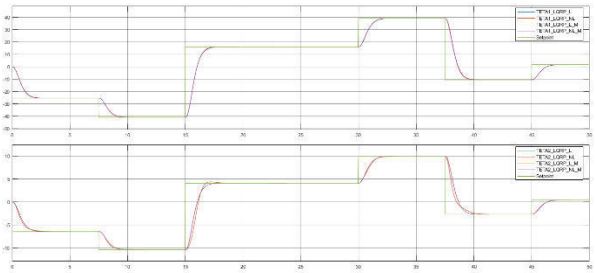


Fig.6. Respuesta transitoria de las variables θ_1 y θ_2

Controlador QFT:

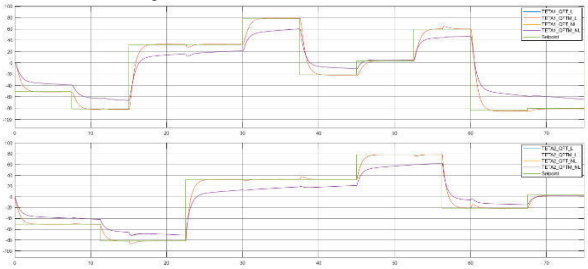


Fig.7. Respuesta transitoria de las variables θ_1 y θ_2

En la herramienta de simulink se implementa el modelo no lineal con cada una de las estrategias de control y se evalúan los índices de error ante un setpoint variable. Los índices de error que se tomaron en cuenta fueron: integral del error absoluto (IAE), integral del error cuadrático (ISE), integral del tiempo por el error absoluto (ITAE) e integral del tiempo por el error cuadrático (ITSE), definidos por las ecuaciones 56 a 59, donde *e(k)* es el vector del error y *t(k)* el vector de tiempo (R. B. P. C. Padraig Basquel, 2017).

$$ISE = \sum_{k=0}^{\infty} e(k)^2 \quad (60)$$

$$ITSE = \sum_{k=0}^{\infty} t(k)e(k)^2 \quad (61)$$

$$ISE = \sum_{k=0}^{\infty} |e(k)| \quad (62)$$

$$ISE = \sum_{k=0}^{\infty} t(k)|e(k)| \quad (63)$$

Se analizo el comportamiento del sistema durante la simulación y se determinaron los rangos máximos de trabajo del sistema con cada controlador como se muestra en la tabla 2 y estos fueron los valores usados para simular y obtener la respuesta transitoria de la variable de salida con cada controlador, luego se hallaron los índices de error mostrados en la tabla 3.

Tabla 2: Rangos máximos de trabajo del sistema con cada controlador

	CAMBIOS A TIEMPOS IGUALES		CAMBIOS A TIEMPOS DIFERENTES	
Control	RANGO θ1	RANGO θ2	RANGO θ1	RANGO θ2
PID	-180 -180	-70-180	-180 -180	-50-180
LQR Luenberger	-180-180	-45-180	-180 -180	-30-180
QFT	-90-90	-22.5 -22.5	-90 -90	-11.25 -11.25

Tabla 3: Índices de errores (IAE, ITAE, ISE, ITSE)

Variables Yi	IAE	ITAE	ISE	ITSE
Control PID	1.847	1.669	1.785	0.9432
Control LQG	1.483	1.847	1.385	0.8525
Control QFT	2.616	4.676	3.074	4.361

5. CONCLUSIONES

El articulo describe el modelo dinámico y diseño de tres estrategias de control, PID, LQR con observador de Luenberger y QFT, para un manipulador planar de dos grados de libertad el cual realiza un movimiento en el plano X, Y rotando alrededor del eje Z. Se evalúa la respuesta del sistema en lazo cerrado, mediante las herramientas de SIMULINK, obteniendo tres criterios de selección del mejor controlador el primer criterio fue el comportamiento de la respuesta transitoria, este arrojo que el controlador LQR con observador de Luenberger resulto ser la mejor estrategia de control, debido a que presenta un tiempo de establecimiento y sobrepaso menor, comparado con el regulador PID y el control robusto QFT. El segundo criterio para la selección fueron los índices de error, los cuales permitieron llegar a la conclusión de cual era el mejor controlador determinando cuál de ellos necesita menos energía para poder llegar al punto de consigna, en este caso fue el controlador LQR con observador de Luenberger y el ultimo criterio para la selección del mejor controlador fue la tabla de rangos de trabajo máximos de cada controlador pues me permite ver en que rangos opera correctamente cada controlador y hasta donde podría manipular el robot de dos grados de libertad sin que el controlador deje de funcionar.

6. REFERENCIAS

[1]. Murray, R. (1994). *Robot Dynamics and Control,* CRC press Ed, Segunda edición. Florida.

[2]. Ogata, K. (2004). Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, Cuarta edición, Madrid.

[3]. H. Bode, (1945). Network analysis and feedback amplifier design, Van Nostrand, New York

[4]. Mandava, R, K. Vundavalli, P, R. (2015). "Design of PID Controllers for 4-DOF Planar and Spatial Manipulators", International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems – RACE, Chennai, India.

[5]. D. Muro-Maldonado, A. Rodriguez-Angeles, C.A. Cruz-Villar. (2007). "Sliding PID Control for Trajectory Tracking of a 2 DOE Robot Manipulator: Simulations and Experiments", ICEEE, ciudad de Mexico, Mexico

[6]. Kwiatkowski, A. Werner, H. (2005). "LPV Control of a 2-DOF Robot Using Parameter Reduction," IEEE Conference on Decision and Control, Sevilla, España.

[7]. R. Cord&, E. Sanz, P. Vega. (1998). "Robust Control in Robotic Manipulators with DC-Motors", IEEE, Salamanca, España.

[8]. Y. a. O. Y. Chait, (1993). "Multiple input/single output computer-aided control design using the quantitative feedback theory" International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. Vol. 3, pp. pp.47-54.

[9]. R. B. P. C. Padraig Basquel, (2017). "Optimal closed-loop transfer functions for non-standard performance indices," de 2017 28th Irish Signals and Systems Conference (ISSC), Killarney.

[10]. Botero Castro, H, C. Álvarez Zapata, H, D (2008). "Una revisión de los métodos más frecuentes para la estimación del estado en procesos químicos", Dyna, Año 76, Nro. 158, pp. 135-146. Medellín, Colombia.

[11]. B. G, (1988). "Principles of Feedback Control" Wiley, vol. Vol (1).

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

COMPARACIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y CORRIENTE PARA LA DETECCIÓN DE LA SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANAJES

COMPARISON OF VIBRATION AND CURRENT SIGNALS FOR THE DETECTION OF THE SEVERITY OF FAULTS IN GEARS

Ing. David Chingal Imaicela[*], PhD. Vinicio Sánchez Loja[*], PhD. Diego Cabrera[*], PhD. Mariela Cerrada[*], PhD. Rafael Vásquez[**]

[*] **GIDTEC,** Universidad Politécnica Salesiana.
Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca, Azuay, Ecuador
E-mail: renevinicio@gmail.com, cide-91@hotmail.com
[**] **Universidad Pontificia Bolivariana**.
Medellin, Colombia

Resumen: Está investigación tiene como objetivo comparar las señales de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de la severidad de fallos en engranajes. Para realizar el estudio de simularon los fallos de picadura y rotura de diente en engranes rectos con un total de nueve niveles de severidad para cada fallo. Como resultado mediante la aplicación de la FFT a las señales adquiridas se identificó la existencia de bandas laterales a través de la frecuencia de línea de alimentación del motor tales como; frecuencias de rotación del eje de entrada, eje de salida y frecuencias de engranaje, donde la vibración pudo detectar fallos incipientes y mediante la señal de corriente fallos severos.

Palabras clave: Monitoreo de la condición, AFCM, engranes, severidad de fallos.

Abstract: This research aims to compare the vibration and current signals of an induction motor for the detection of the severity of gear faults. To perform the study, they simulated pitting and tooth breakage failures in straight gears with a total of nine levels of severity for each failure. As a result of the application of the FFT to the acquired signals, the existence of sidebands was identified through the frequency of the motor power line such as; rotation frequencies of the input shaft, output axis and gear frequencies, where the vibration was able to detect incipient failures and through the current signal severe failures.he research aims at the acquisition of electrical current signals from the induction motor coupled to a gearbox using the MCSA technique, this with the purpose of contribution in the study of gears faults detection by electrical current signals. The simulated faults were pitting and tooth breakage in spur gears with a total of nine severity levels for each fault. As a result, the existence was identified of sidebands through the power line frequency of motor such as; rotation frequencies of the input shaft, output shaft and gear frequencies.

Keywords: Condition Monitoring, MCSA, gears, fault severity.

1. INTRODUCCIÓN

Los fallos en sistemas mecánicos como las cajas de engranajes pueden ser determinados por medio del monitoreo de la condición, los métodos de monitoreo más empleados son: vibraciones, emisiones acústicas, corriente eléctrica, ensayos no destructivos y tribológicos.
El monitoreo por vibraciones es la técnica de mayor uso para detectar fallos en cajas de engranajes, las vibraciones identifican con exactitud alrededor del 90% de todos los fallos, de manera que se pueda tomar acciones de mantenimiento tempranas (Devendiran y Manivannan, 2016). El monitoreo por corriente eléctrica, detecta fallos en los motores trifásicos, los fallos de rotura del rotor, excentricidad, rodamientos, etc., son detectados por medio del análisis de firma de corriente del motor (AFCM).
El AFCM detecta la vibración generada por la caja de engranajes debido a que el motor eléctrico se comporta como un transductor logrando detectar las frecuencias de los componentes mecánicos de la caja de engranajes y convertirlas en corrientes inducidas, generadas en los devanados del motor (Schoen, Habetler, Kamran, y Bartfield, 1995). Existen varias investigaciones sobre el uso del AFCM en la detección de fallos en sistemas mecánicos los cuales se presentan en (Ye, Wu, y Sadeghian, 2003), (Kar y Mohanty, 2006).
En este trabajo se presenta la comparación de las señales de vibración y corriente adquiridas de la caja de engranes, con el fin de comparar la señal de corriente cuando el engrane presenta fallo en sus dientes.

2. ANTECEDENTES

2.1 Análisis de firma de corriente del motor (AFCM)

La técnica AFCM es la más usada para el diagnóstico de la condición del motor eléctrico (Benbouzid, 2000). EL AFCM puede diagnosticar el estado de las barras del rotor, devanado, excentricidad y rodamientos. Para realizar este análisis es necesario adquirir información de la señal de corriente que alimenta al motor eléctrico mediante un sensor de corriente eléctrica.
Para detectar fallos de los elementos mecánicos fuera del motor, se han encontrado algunos documentos como (Kar y Mohanty, 2006) los cuales detectan fallos en engranes por medio de las fluctuaciones de torque en la caja de engranajes que se generan debido a fallos en los engranes.
Los autores Xu *et al.* (Xu, De Doncker, y Novotny, 1988) desarrollaron una ecuación para calcular el torque del entrehierro de un motor de inducción y se presenta en la Ecuación (1).

$$T = \frac{3\,P_p}{2}\,\lambda_s\,i_{sT} \quad (1)$$

Donde:
P_p: número de par de polos
λ_s: amplitud de enlace del flujo del estator
i_{sT}: componente de la corriente del estator en la dirección 90 grados por delante del vector de flujo, también denomina componente del torque motor.
En presencia de la vibración torsional a la frecuencia (f_o) el torque del entrehierro (T) del motor de inducción se calcula con la Ecuación (2) (Mohanty, 2014).

$$T = T_0 + A_T\,\cos(2\pi f_o t + \phi) \quad (2)$$

Donde:
T_0: torque promedio.
A_T: torque de giro en el eje de la maquinaria rotativa.
f_o: velocidad del eje de la maquinaria rotativa.
ϕ: fase respectiva de f_o.

Por lo tanto, sólo los efectos de las vibraciones torsionales causadas por las frecuencias de rotación del eje son considerados en las señales de corriente. Cada corriente de fase del estator consiste en un componente de corriente magnetizante i_{sM}, que está en fase con el vector de flujo; y un componente del torque motor i_{sT}, que está 90° por delante del vector de flujo. Estos componentes están dados por las Ecuaciones (3) y (4) (Mohanty, 2014) y se presenta en la Fig. 1.

$$i_{sM} = i_{sM0} + A_{sM}\,\mathrm{sen}(2\pi f_o t + \varphi_M) \quad (3)$$

$$i_{sT} = i_{sT0} + A_{sT}\,\mathrm{sen}(2\pi f_o t + \varphi_T) \quad (4)$$

Donde:
i_{sM0} e i_{sT0}: valor promedio de las componentes i_{sM} e i_{sT}.
A_{sM} y A_{sT} son proporcionales a A_T.
φ_M y φ_T son las fases respectivas donde se proyecta la corriente magnetizante y torque del motor.

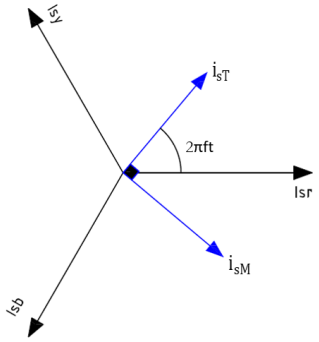


Fig. 1. Diagrama vectorial de las componentes de corriente en el motor de inducción

La corriente del estator I_{sr} como se presenta en la Fig. 1, puede ser medida cuando se proyecta sobre la corriente de fase r del motor trifásico con una frecuencia de alimentación eléctrica f. La corriente se puede calcular con la Ecuación (5) (Mohanty, 2014), (Bravo Imaz, 2018).

$$I_{sr} = i_{s0}\,\mathrm{sen}(2\pi ft + \varphi_{s0}) + \frac{1}{2}\{A_{sM}\cos[2\pi(f - f_0)t - \varphi_M] + A_{sT}\cos[2\pi(f - f_0)t - \varphi_T]\} - \frac{1}{2}\{A_{sM}\cos[2\pi(f + f_0)t + \varphi_M] - A_{sT}\cos[2\pi(f + f_0)t + \varphi_T]\} \quad (5)$$

La Ecuación (5) establece que el efecto de una vibración con una frecuencia f_o puede observarse fácilmente en la corriente de alimentación como componentes de bandas laterales de frecuencia $(f+f_o)$ y $(f-f_o)$ (Bravo Imaz, 2018).
Cuando no hay defectos en el motor de inducción y ningún torque de carga, la corriente dibuja una onda sinusoidal pura (Mohanty, 2014) como se presenta en la Fig. 4. Pero debido a las frecuencias oscilantes i_{sM} e i_{sT}. y la Ecuación (5), la forma de onda de la corriente se verá afectada en cualquiera de sus fases como se presenta en la Fig. 2.

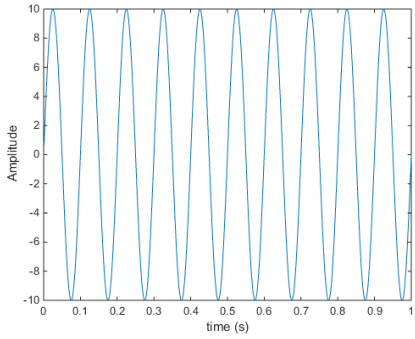


Fig. 2. Onda sinusoidal de un motor sin carga

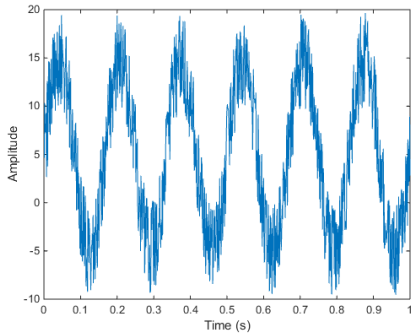


Fig. 3. Onda sinusoidal con torque y carga en el motor

En la Fig. 3 se presenta que el torque ejercido en el eje del motor, induce bandas laterales a través de la frecuencia de alimentación eléctrica en la firma de corriente dibujada por un motor de inducción. Este torque dará lugar posteriormente a fluctuaciones en la velocidad, que es simplemente la vibración torsional del eje.
Los fallos en engranes producen una anomalía en el par de carga, el cual es detectado por el motor. Esta anomalía se transfiere a la corriente del motor desde la carga. Dependiendo de la anomalía, se pueden ver frecuencias únicas en el espectro de frecuencia actual (Wang, 2001). Las oscilaciones mecánicas en la caja de engranajes cambian la excentricidad en el entrehierro, lo que resulta en cambios en la forma de onda de la corriente. En consecuencia, esto puede inducir componentes de corriente a la frecuencia de alimentación y se observa en la Fig. 4.

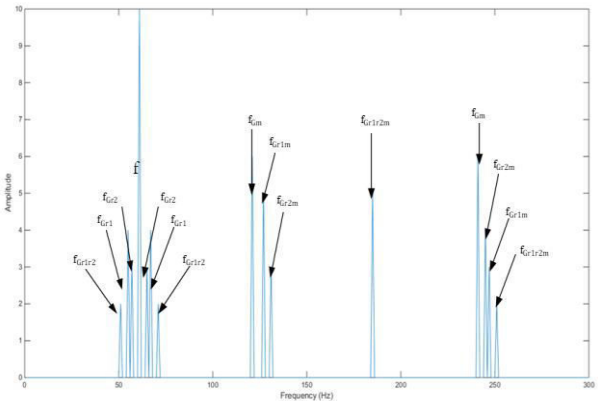


Fig. 4. Componentes de frecuencia de corriente alrededor de la frecuencia de alimentación

Donde:
f es la frecuencia de alimentación eléctrica del motor.
m, n, q=1, 2, 3, … son los números de armónicos presentes en la señal de corriente.
f_{r1} y f_{r2} son las velocidades de rotación del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.
f_m es la frecuencia de engranaje (GMF).
f_{Gr1} y f_{Gr2} son las componentes de frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.
f_{Gr1r2} es la suma de las componentes de la frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.
f_{Gm} es la componente de la frecuencia de engranaje (GMF).
f_{Gr1m} y f_{Gr2m} es la suma de las componentes de la frecuencia de engranaje y frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes respectivamente.
f_{Gr1r2m} es la suma total de la frecuencia de engranaje y frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes respectivamente.

2.2 Frecuencia de engranaje (GMF)

La frecuencia de engranaje (GMF), es la frecuencia a la que los dientes del engranaje se acoplan en una caja de engranajes. Hay tres frecuencias importantes involucradas en las cajas de engranajes: velocidad de entrada, frecuencia de engranaje y velocidad de salida. Las cajas de engranajes siempre tendrán un fuerte componente de vibración en la frecuencia de engranaje. Para calcular la frecuencia de engranaje se utiliza la Ecuación (6) y la forma del espectro de frecuencia se presenta en la Fig. 5.

$$GMF = F_g\, Z_1 \ [Hz] \quad (6)$$

Donde:
F_g es la velocidad de entrada del motor eléctrico en Hertz
Z_1 es el número de dientes del piñón

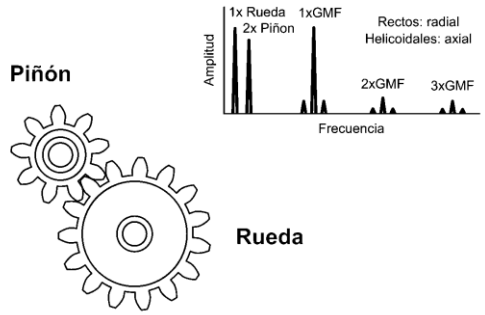


Fig. 5. Espectro característico de los engranes

3. METODOLOGÍA

3.1 Banco de vibraciones

El banco de vibraciones está compuesto por un motor de inducción trifásico, una caja de engranajes de diente rectos de una etapa, un freno magnético que actúa como carga mecánica.
El motor de inducción trifásico es de 2 Hp, 1110 rpm, 60 Hz y 3 polos el cual está conectado a un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW, el movimiento que se transmite al eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que trasmite el movimiento al freno magnético Rosati de 8.83 kW, el cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua marca TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La configuración del banco de vibraciones se presenta en la Fig. 6 y las especificaciones técnicas en la tabla 1.

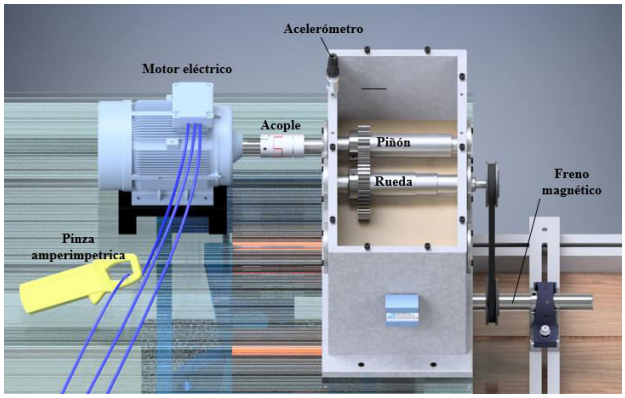


Fig. 6. Banco de vibraciones

Tabla 1: Especificaciones del banco de vibraciones

Características del banco	
Piñón	32 dientes
Rueda	48 dientes
Pinza amperimétrica	Cantidad 1
Acelerómetro	Cantidad 1
Velocidad	6 Hz, 12Hz, 16Hz
GMF	192 Hz, 384 Hz, 512Hz
Frecuencia alimentación motor	18 HZ, 36Hz, 48Hz
Carga mecánica	0V, 10V, 20V

3.2 Severidad de fallos

Los fallos en engranes se pueden atribuir a la deficiencia del material, desgaste con el transcurrir de las horas de funcionamiento, funcionamiento defectuoso, defecto de montaje y mala lubricación. Los tipos de fallos utilizados son rotura de diente (*tooth breakage*) y picadura (*pitting*).

3.2.1 Rotura de diente

Los fallos por rotura de diente fueron construidos con una máquina fresadora, y fueron diseñados para replicar un fallo de rotura iniciando con un fallo leve, hasta concluir con un fallo severo con un total de 9 niveles de severidad tal como se presenta en la tabla 2 y Fig. 7.

Tabla 2: Niveles de severidad para rotura de diente en engrane

Código	Número de dientes	Longitud del fallo (m)	Área fallo (mm^2)	Volumen fallo (mm^3)	Porcentaje de fallo (%)	Nivel de severidad
-----	0	0	0	0	0.0	Normal
P1	1	5.5	0.84	4.62	1.3	Leve
P2	1	15	0.95	14.25	4.0	Leve
P3	1	20	1.35	27.00	7.5	Leve
P4	1	10	4.05	40.50	11.3	Leve
P5	1	20	3.66	73.20	20.4	Leve
P6	1	20	10.96	109.6	30.6	Moderado
P7	1	20	7.3	146.00	40.8	Moderado
P8	1	10	25.16	251.60	70.2	Severo
P9	1	20	17.9	357.20	100.0	Severo

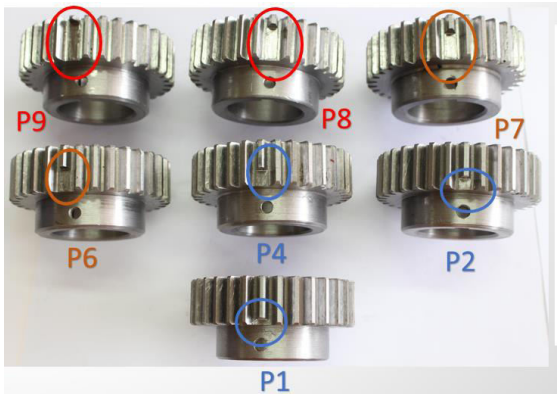


Fig. 7. Fallos construidos por rotura de diente

3.2.2 Picadura de diente

Los fallos por picaduras fueron construidos artificialmente por medio del mecanizado por electroerosión, debido a que con esta técnica de mecanizado se puede ir controlando los porcentajes requeridos del fallo. Se construyeron fallos iniciando con un fallo leve, hasta concluir con un fallo severo con un total de 9 niveles de severidad tal como se presenta en la tabla 3 y Fig. 8.

Tabla 3: Niveles de severidad para picadura de diente en engrane

Código	Diámetro (mm)	Área picadura (mm^2)	Porcentaje de picadura (%)	Profundidad (mm)	Severidad
------	----------	---------	----------	---------	Normal
P1	1.5	1.77	1.96	0.5	Leve
P2	1.5	5.30	5.89	0.5	Leve
P3	1.5	7.07	7.85	0.5	Leve
P4	1.5	10.60	11.78	0.5	Leve
P5	1.5	14.14	15.71	0.5	Leve
P6	2	25.13	27.93	0.5	Moderado
P7	2	37.70	41.89	0.5	Moderado
P8	2	62.83	69.81	0.5	Severo
P9	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Severo

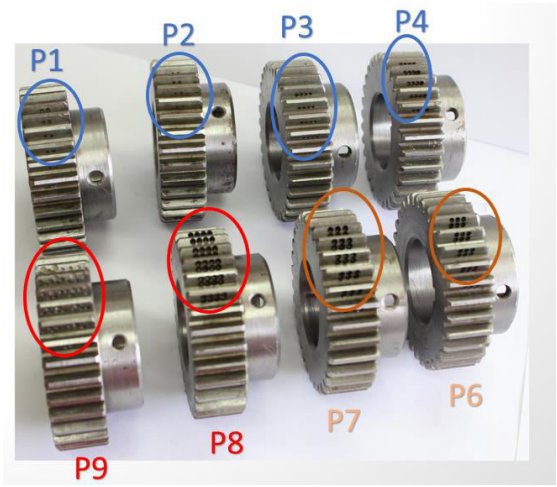


Fig. 8. Fallos construidos por picadura de diente

4. RESULTADOS

En esta sección se comparan las señales de corriente y vibración, demostrando que la técnica análisis de firma de corriente del motor es una opción aparte del monitoreo por vibración para la detección de fallos en cajas de engranajes.
Las señales de vibración y corriente son adquiridas por los sensores y visualizadas mediante la transformada rápida de Fourier, donde se puede observar los espectros de las frecuencias características de la caja de engranajes.

4.1 Comparación de las señales

En la Fig. 9 y Fig. 10 se presentan las señales de vibración y corriente del piñón sin condición de fallo. La GMF se puede reconocer fácilmente en el espectro de vibración a una frecuencia de 185.8 Hz con sus respectivas bandas laterales a ± 6 Hz que corresponden a la frecuencia de giro del piñón.
En el espectro de corriente también se puede detectar la GMF del piñón a una frecuencia 203.1 Hz que es el resultado de sumar la GMF y la frecuencia de alimentación del motor (f_{GMF}+f).

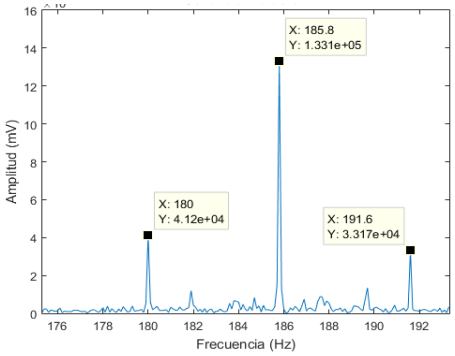


Fig. 9. Señal de vibración del piñón sin condición de fallo

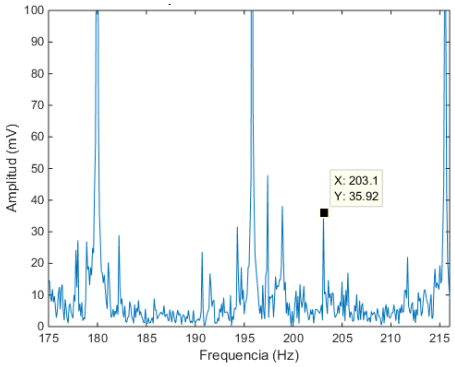


Fig. 10. Señal de corriente del piñón sin condición de fallo

A continuación, se obtuvieron las señales de vibración y corriente con diferentes niveles de severidad de fallo los cuales se presentan en las Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14.
En las Fig. 11 y Fig. 12 se observa como los fallos en el piñón afectan en la visualizan de las señales de vibración por lo que los resultados son validos para detectar fallos en engranes.
En las Fig. 13 y Fig. 14 puede observarse que, aunque se puede rastrear la GMF en las señales de corriente, es difícil interpretar el resultado debido al ruido entremezclado.

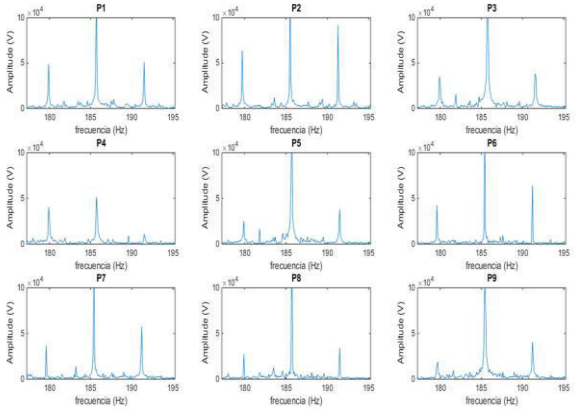


Fig. 11. Señales de vibración de severidad de fallo por rotura de diente

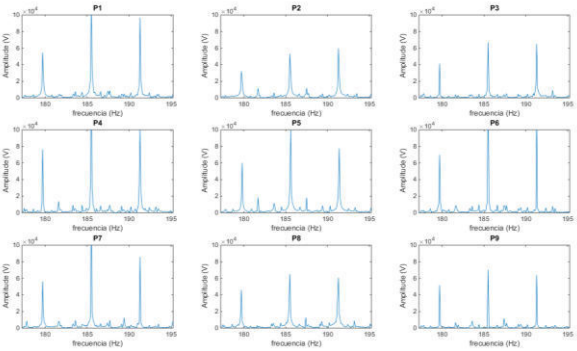


Fig. 12. Señales de vibración de severidad de fallo por picadura

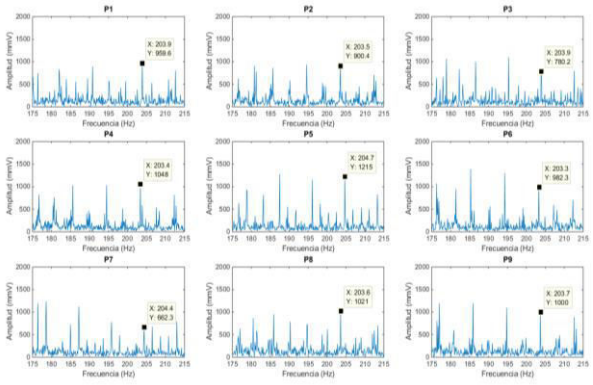


Fig. 13. Señales de corriente de severidad de fallo por rotura de diente

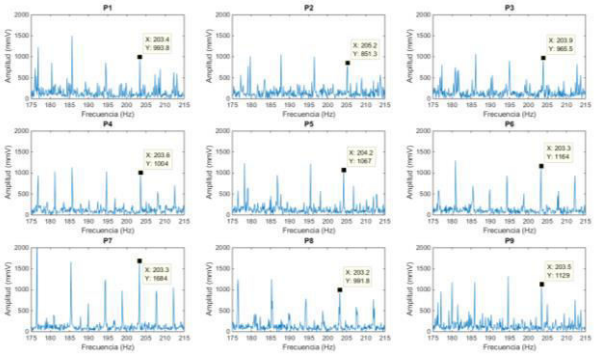


Fig. 14. Señales de corriente de severidad de fallo por picadura

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos establecen que, al existir fluctuaciones de torque en el eje de entrada de la caja de engranajes ocasionados por fallos de engrane como la rotura de diente, pueden ser detectados por el AFCM.

En las señales de vibración, las frecuencias cambian su amplitud a medida que el fallo es más severo. Las frecuencias rotatorias y GMF pueden identificarse claramente en señales de corriente.

El AFCM puede proporcionar un método de detección de fallos no intrusivo sin sensores adicionales en la caja de engranajes.

Con la base de datos de severidad de fallos obtenida, se logra detectar fallos en engranes identificar la existencia de bandas laterales a través de la frecuencia de línea de alimentación del motor; tales como frecuencias de rotación del eje de entrada, eje de salida y frecuencias de engranaje, pero la amplitud de estas bandas laterales tiene menor amplitud en comparación con la frecuencia de la línea, por lo que no se puede realizar un diagnóstico de severidad de fallos.

REFERENCIAS

Benbouzid, M. E. H. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE transactions on industrial electronics*, *47*(5), 984–993.

Bravo Imaz, I. (2018). *Acquisition and processing of new data sources for improved condition monitoring of mechanical systems* (Tesis Doctoral). Universidad del País Vasco, Leoia.

Devendiran, S., & Manivannan, K. (2016). Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, *11*(6), 3966–3975.

Kar, C., & Mohanty, A. R. (2006). Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *20*(1), 158–187.

Mohanty, A. (2014). *Machinery Condition Monitoring*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b17941

Schoen, R. R., Habetler, T. G., Kamran, F., & Bartfield, R. G. (1995). Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *31*(6), 1274-1279. https://doi.org/10.1109/28.475697

Wang, W. (2001). Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *15*(5), 887-903. https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1416

Xu, X., De Doncker, R., & Novotny, D. W. (1988). A stator flux oriented induction machine drive. En *Power Electronics Specialists Conference, 1988. PESC'88 Record., 19th Annual IEEE* (pp. 870–876). IEEE.

Ye, Z., Wu, B., & Sadeghian, A. (2003). Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition. *IEEE transactions on industrial electronics*, *50*(6), 1217–1228.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y EMISIÓN ACÚSTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA

ACQUISITION OF VIBRATION AND ACOUSTIC EMISSION SIGNALS FOR THE FAULT SEVERITY DIAGNOSIS IN ROTATING MACHINERY

Ing. Edison Pacheco[*], PhD. Vinicio Sánchez Loja[*], PhD Diego Cabrera[*], PhD. Mariela Cerrada[*].

[*] **GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana**,
Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca, Azuay, Ecuador.
E-mail: epachecoc@est.ups.edu.ec, renevinicio@gmail.com, dcabrera@ups.edu.ec, cerradam@gmail.com

Resumen: Se adquirió señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de la severidad de fallos en maquinaria rotativa. Las señales de vibración y emisión acústica fueron adquiridas de una caja de engranajes de una etapa donde se simularon fallos de grietas y gripado en los engranes con un total de nueve niveles de severidad para cada fallo. Como resultados se analizo las señales en el dominio de la frecuencia donde se compara el comportamiento de la severidad del fallo de las señales de emisión acústica y vibraciones.

Palabras clave: Monitoreo de la condición, emisión acústica, señal de vibración, severidad de fallos.

Abstract: Vibration and acoustic emission signals were acquired to the diagnosis of the severity of faults in rotating machinery. The vibration and acoustic emission signals were acquired from a single stage gearbox where crack and scuffing failures were simulated in the gears with a total of nine severity levels for each failure. As a result, the signals in the frequency domain were analyzed to compare the behavior of the severity of the failure of the acoustic emission and vibration signals.

Keywords: Condition monitoring, acoustic emission, vibration signals, fault severity.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento basado en la condición (MBC) usa la información que se obtiene a través del monitoreo de la condición (MC). Estableciéndolo correctamente se puede reducir significativamente el costo, tareas innecesarias y riesgos asociados al mantenimiento preventivo y contribuir a la productividad (Galar *et al.*, 2015). El MC se puede definir como un medio para determinar la condición de la máquina y prevenir una falla de la misma sugiriendo acciones de mantenimiento cuando sea necesario (Sánchez, 2018). Mediante un MC que tiene como parámetros a las señales de vibraciones, emisiones acústicas (EA) y corriente, se puede lograr un diagnóstico temprano para disminuir paradas de emergencia (Guiracocha, 2015).

El estudio de la severidad de fallos es una parte importante en un programa de mantenimiento basado en la condición (Jiang *et al.*, 2012). En maquinaria rotativa como los engranes y rodamientos la estimación de la severidad de fallos es esencial para que las acciones preventivas se puedan tomar mucho y se pueda evitar que ocurra una falla en la maquinaria (A. Sharma *et al.*, 2016), si bien estos elementos no son costosos, pero son vitales para el correcto funcionamiento, por lo que un fallo en uno de estos elementos podría generar cuantiosas pérdidas.

La medición de las emisiones acústicas se ha convertido en una técnica viable en el MC en maquinaria rotativa (Toutountzakis & Mba, 2003). Esta técnica es un método nuevo y exitoso en el monitoreo de la condición de maquinaria rotativa y diagnóstico de fallos (Ali *et al.*, 2014). La detección temprana de grietas es posible mediante la adquisición y el análisis de EA, recientemente han captado la aceptación, debido a que el sensor EA puede ser mas sensible a detectar la presencia de fallos iniciales que los sensores de vibración (Yoon & He, 2015; Scheer *et al.*, 2007).

1.1 Monitoreo de vibraciones

El monitoreo de vibraciones ha demostrado ser una técnica eficiente en la detección de fallos en maquinaria rotativa y en los sistemas mecánicos empleados en diferentes sectores de la industria (V. Sharma & Parey, 2017). En el MC el análisis de vibraciones es la técnica mas utilizada de la industria, debido a que puede identificar con gran precisión el 90% de todos los fallos de maquinaria por el cambio en las señales de vibración que se producen y el nivel de señal puede dar una predicción con gran exactitud de un fallo futuro (Devendiran & Manivannan, 2016).

1.2 Monitoreo de emisiones acústicas

Se puede definir a las EA como ondas elásticas transitorias generadas por la liberación rápida de energía causada por la deformación o un fallo en la superficie de un material (Pao *et al.*, 1979). Dentro del MC en maquinaria rotativa, las EA se definen como ondas transitorias generadas por la interacción de dos elementos en movimiento relativo, estas pueden ser causadas por impacto, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, pérdida de material, cavitación, fugas, entre otras (Mba & Rao, 2006).

Las señales EA pueden clasificarse en señal de ráfagas (*burst*) y señal continua. Las señales tipo ráfagas se dan cuando las fuentes monitoreadas no son repetibles y ocurren discretamente, además tienen puntos definidos claramente de principio y fin del ruido que provoca el defecto, son características de aparición y crecimiento de grietas en un material, cavitación y corrosión (Ferrando Chacon, 2015; Sidorova, 2010). Estas señales tienden a no ser más largas que unas pocas centésimas de segundo (Naumann, 2016).

Las señales de EA continuas tienen amplitudes y frecuencias variables, pero nunca se terminan, son típicamente emisiones de baja energía que ocurren cuando los mecanismos de fricción se presentan dentro de una estructura y no muestran ninguna característica visualmente obvia en el dominio del tiempo (Ferrando Chacon, 2015; (Sidorova, 2010; Naumann, 2016). En la *Fig. 1* se puede observar la diferencia entre las señales tipo ráfaga y continua.

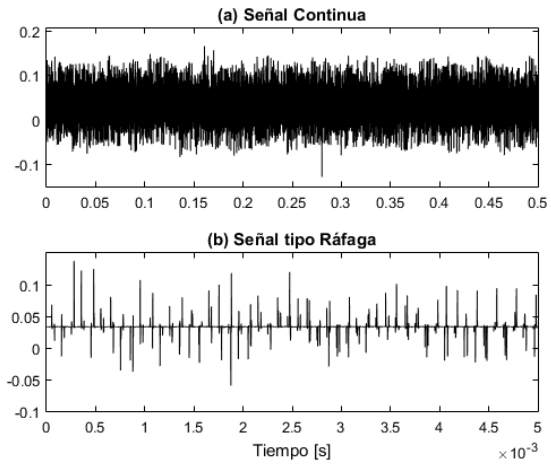


Fig. 1. (a) Señal continua (continuous signal), (b) señal tipo ráfaga (burst signal)

Una señal característica de EA tipo ráfaga se presenta en la *Fig. 2*, los datos que se obtienen de la forma de onda, se usan para sacar información sobre la fuente, tal como su actividad e intensidad (Sidorova, 2010; Degala, 2008).

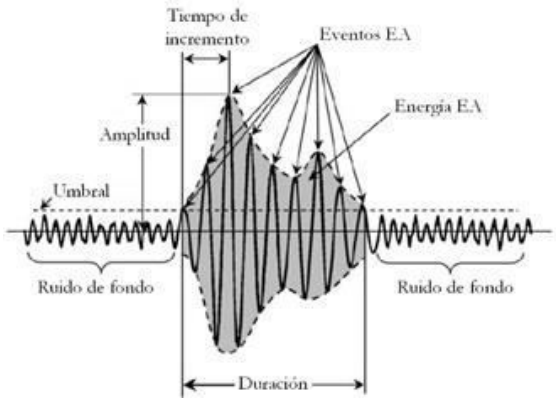


Fig. 2. Parámetros de la señal EA (Non-Destructive, 2016)

Amplitud (A): se la define como la tensión de pico de una onda, la cual es medida en decibelios (dB).
Tiempo de llegada: tiempo absoluto en el cual aparece la primera señal de descubrimiento de un fallo.
Tiempo de incremento: es el tiempo que tarda la onda en alcanzar su máximo valor tomando como inicio el primer cruce con el umbral.
Duración: es el tiempo existente entre el primer y último cruce de la onda con el umbral.
Energía: área bajo la curva generada por la envolvente de la señal de tiempo.
Eventos: número de pulsos emitidos por el circuito de medición cuando la señal es mayor que el umbral.

Las señales tipo ráfagas y continuas, están asociadas con la maquinaria rotativa, por ejemplo, una señal continua puede resultar de un flujo de fluido turbulento, mientras que la señal tipo ráfagas está asociada con la acción rodante transitoria. El ruido también es de tipo continuo (Mba & Rao, 2006). El impacto que es importante cuando se monitorea el fallo de un rodamiento, se considera una fuente de señal tipo ráfagas (Naumann, 2016). Las señales tipo ráfaga son emitidas por estructuras estáticas, los eventos pueden ser vistos claramente y pueden ser analizados por separado. En el caso de maquinaria rotativa, es posible que eventos individuales tengan una amplitud muy similar y se generen con la suficiente frecuencia como para que la señal parezca continua; sin embargo, la señal más común en maquinaria rotativa es cuando la señal continua aparece como fondo y los eventos más energéticos aparecen como picos (Hamel, 2013)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se construye un montaje experimental en una caja de engranajes para adquirir señales de vibración y EA para el diagnóstico de severidad de fallos en engranes. Se propone la construcción de dos fallos artificiales en los engranes: grietas y gripado con nueve niveles de severidad. La técnica que se utiliza para la comparación de las señales es mediante el análisis de la amplitud de la frecuencia de engranaje.

2.1 Banco de vibraciones

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, Ecuador, consta de todos los implementos necesarios para realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa como: desbalanceo, desalineación y combinaciones de fallos en engranes y rodamientos. El banco se conforma por cinco unidades principales: (i) unidad de mando, (ii) unidad motriz, (iii) unidad de carga, (iv) unidad de sistemas rotativos y (v) unidad de sistemas de adquisición de datos, tal como se ilustra en la *Fig. 3*.

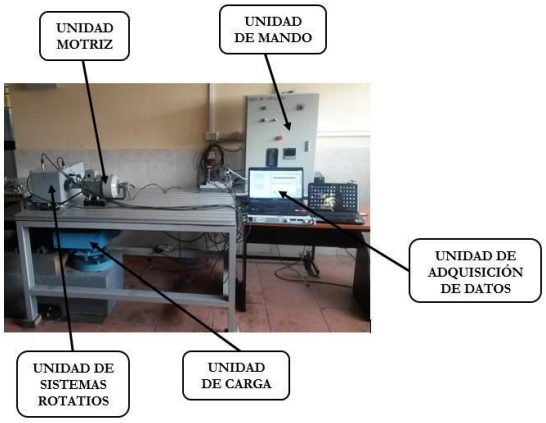


Fig. 3. Banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana.

El movimiento se genera por un motor marca Siemens modelo 1LA7 096-6YA60 de 2 hp; el movimiento que se transmite hacia el eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un

acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que transmite el movimiento al freno magnético Rosati de 883 kW mediante una banda flexible, lo cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La velocidad de giro del motor es controlada por medio de un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW.

El sistema de adquisición de datos de las señales de vibración y EA se presenta en la *Fig. 4*. Las señales de vibración son censadas por cuatro acelerómetros (A1, A2, A3, A4), modelo IPC 63C01, cada señal de los acelerómetros es adquirida a 50 kS/s por una tarjeta NI 9234. Las señales EA son censadas por dos sensores de EA (EA1, EA2) modelo *Physical Acoustics* WD que van montadas en las paredes más cortas de la caja de engranajes, cada señal de EA ingresa a un preamplificador MISTRAS 0/2/4C, cada señal EA es adquirida a 1MS/s por la tarjeta NI 9223. Las dos tarjetas NI 9234 y NI 9223 se acoplan a un chasis NI cDAQ-9188 que envía datos vía Ethernet a un computador portátil ASU ROG GL752VW-DH74 en el cual se dispone de LabVIEW para la adquisición de las señales y Matlab para el procesamiento de las señales.

La caja de engranajes se puede configurar para desarrollar pruebas en una o dos etapas, se pueden montar engranes de dientes rectos o helicoidales. Los engranes son construidos de acero E410, el número de dientes para el piñón y el engrane es de Z1=32 y Z2=48 respectivamente. El espesor de los dientes es de 20 mm, módulo de 2.25 y un ángulo de presión θ=20°. La lubricación utilizada para la caja de engranajes fue Gulf HARMONY A W ISO VG 68. La localización de los fallos fue en el engrane Z1, cada fallo tiene una condición normal P1 y nueve niveles de severidad P2 a P10. La duración de la adquisición de cada muestra fue de 10 segundos. La frecuencia de rotación del motor fue de 6Hz (F1), 12Hz (F2) y 16Hz (F3) y finalmente las cargas aplicadas fueron de 0V (L1), 10V (L2) y 20V (L3).

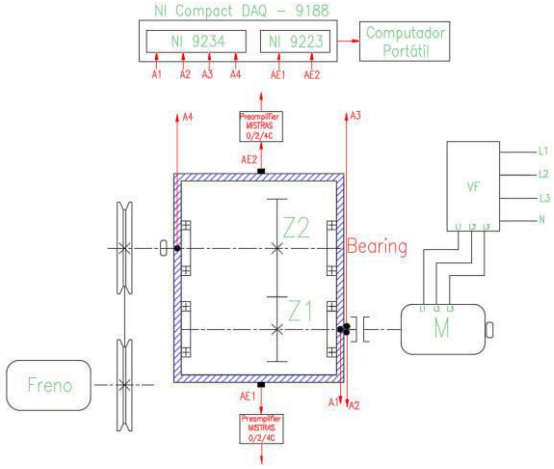


Fig. 4. Sistema de adquisición de señales.

2.2 Fallos simulados en engranes

Los engranes son uno de los principales elementos mecánicos que se encuentran en la gran mayoría de la maquinaria rotativa para transmitir movimiento, un fallo en uno de estos elementos puede generar daños catastróficos. El monitoreo de vibraciones es la técnica más utilizada para detectar fallos en engranes, pero actualmente el monitoreo de EA esta empezando a ganar terreno en la detección de fallos, debido a su precisión en detectar fallos incipientes. En este artículo se seleccionaron dos fallos: grietas en los dientes den engrane y el gripado en la cara del diente del engrane.

Fallo por grieta: un fallo por grieta *(crack)* es uno de los modos de fallos mas frecuentes en los engranes. La identificación de diferentes niveles de grietas, especialmente para las iniciales, es un gran desafío en el diagnóstico de fallos de engranes (Lei & Zuo, 2009). Las grietas pueden ocurrir en cualquier parte del diente, debido a las altas tensiones mecánicas o de temperatura, defectos de los materiales por el uso de tecnología de fabricación de baja calidad (Starzhinskii *et al.*, 2008), cargas excesivas o fatiga (Liang *et al.*, 2015). Si las grietas no son detectadas en una etapa temprana, terminan con la fractura del diente, por esta razón también son denominadas fracturas progresivas (Chaari *et al.*, 2009).

El fallo de grieta se construirá en un solo diente con un ángulo de 45° y un espesor de 0.40 mm. En la *Tabla 1* se especifica la profundidad y la

longitud para cada nivel de severidad. La máxima profundidad de la grieta es la mitad del espesor del diente, debido a que el diente se romperá rápidamente cuando la profundidad sea más de la mitad del espesor del diente (Lei & Zuo, 2009; (Wang *et al.*, 2015).

Tabla 1: Niveles de severidad para grietas.

Severidad [%]	Profundidad [mm]	Longitud [mm]	Nivel de severidad
5.00	0.10	1.00	Leve
12.50	0.20	2.50	Leve
25.00	0.50	5.00	Leve
37.50	0.70	7.60	Leve
45.00	0.90	9.00	Leve
60.00	1.00	12.00	Moderado
75.00	1.50	15.00	Moderado
85.00	1.70	17.00	Severo
100.00	1.90	20.30	Severo

Fallo por gripado: el fallo por gripado o rayado conocido en inglés como *"scuffing"*, se presenta como una eliminación o deformación plástica de la superficie de contacto de los dientas, causada principalmente por sobrecarga en el funcionamiento durante ciclos prolongados y mala lubricación. Una vez iniciado el fallo este se propaga pasando de líneas de espesor despreciables a líneas marcadas incluso del mismo espesor del ancho del diente (Ebersbach *et al.*, 2006; Liou, 2010; Klein, 2009).

El fallo por gripado fue simulado en un solo diente del engrane, con una profundidad constante de 0.1 mm para todos los casos. La *Tabla 2* especifica el porcentaje del nivel de severidad para la generación del gripado.

Tabla 2: Niveles de severidad para el gripado.

Severidad [%]	Líneas	Longitud [mm]	Espesor [mm]	Nivel de severidad
1.67	2	1.50	0.50	Leve
3.33	2	1.50	1.00	Leve
5.00	2	1.50	1.50	Leve
6.67	2	1.50	2.00	Leve
8.89	2	2.00	2.00	Leve
16.67	2	2.50	3.00	Moderado
23.33	2	3.00	3.50	Moderado
40.00	2	4.50	4.00	Severo
60.00	3	4.50	4.00	Severo

2.3 Verificación de frecuencias características

Cuando una caja de engranajes se encuentra en buenas condiciones generan frecuencias características que están determinadas por la relación de transmisión entre el piñón-engrane y la frecuencia de giro del motor la cual se puede calcular mediante la ecuación (1); esta relación se la conoce como frecuencia de engranaje *"Gear Mesh Frequency, (GMF)"* la cual se presenta en la ecuación (2). Para el diagnóstico de la severidad de fallos en los engranes se efectuó mediante el comportamiento de la amplitud de la GMF en las señales de vibración y EA en el domino de la frecuencia. Finalmente se realizará una comparación entre las señales de vibración y EA conforme avanza la severidad del fallo.

$$F_g = \frac{RPM_{motor}}{60} \ [Hz] \qquad (1)$$

$$GMF = F_g * Z_1 \qquad (2)$$

Dónde:
RPM_{motor}: Velocidad de giro del motor en rpm
Z_1: Número de dientes del piñón

3. RESULTADOS

3.1 Severidad de fallos mediante vibración y EA

En las señales de emisión acústica que se presentan en la *Fig. 5* y *Fig. 6*, para fallos de grietas y gripado respectivamente, la identificación de la GMF se vuelve complejo, debido a que los armónicos se encuentran a lo largo de toda la señal, es decir se tiene mayor información la cual no puede ser interpretada con facilidad de forma visual; por lo que se requiere el uso de indicadores de condición y/o técnicas de inteligencia artificial para el diagnóstico adecuado con señales de emisión acústica.

Una vez identificada la GMF de forma visual se puede observar como esta va incrementando conforme la severidad del fallo avanza. Por lo cual mediante las señales de EA es posible identificar los diferentes niveles de severidad de un fallo, pero

no se puede identificar qué tipo de fallo se está presentando.

En las señales de vibración que se presentan en la *Fig. 7* y *Fig. 8*, para fallos de grietas y gripado respectivamente, se puede identificar la GMF sin dificultad debido a que esta se encuentra en el mismo rango de frecuencia y está acompañada de bandas laterales a la frecuencia de giro del motor. La información que presentan las señales de vibración en el dominio de la frecuencia para los dos fallos seleccionados es poca en comparación a las señales de EA. Mediante las señales de vibración resulta complejo identificar la severidad de un fallo debido a que, la amplitud de la GMF varia de forma no uniforme para ambos fallos seleccionados.

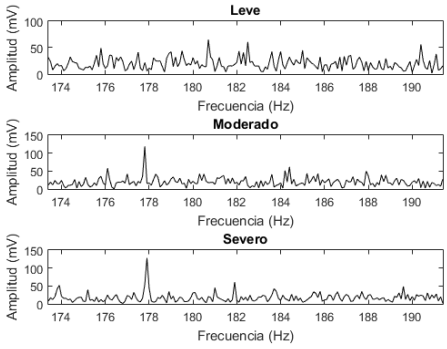


Fig. 5. Señales de EA para severidad de fallo por grieta.

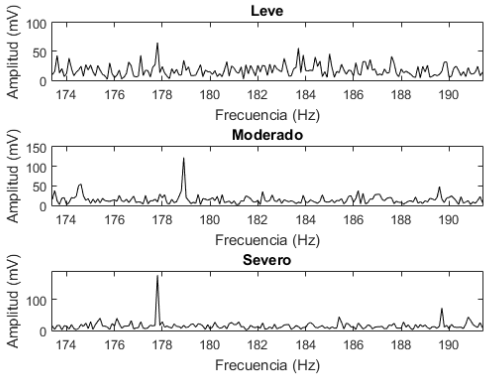


Fig. 6. Señales de EA para severidad de fallo por gripado.

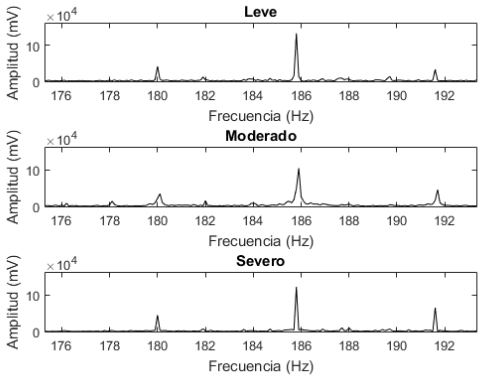


Fig. 7. Señales de vibración para severidad de fallo por grieta.

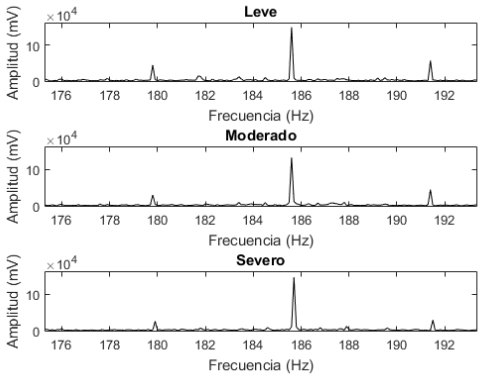


Fig. 8. Señales de vibración para severidad de fallo por gripado.

4. CONCLUSIONES

Mediante el estudio bibliográfico se detalló a profundidad el estudio de las emisiones acústicas aplicadas a la maquinaria rotativa, donde se resalta la importancia y la efectividad de esta técnica para detectar los fallos incipientes dentro del monitoreo de la condición en comparación con las señales de vibración.

Con las señales de vibración se logró detectar fallos en engranes con facilidad mediante la frecuencia del engranaje, pero resulta complicado determinar el avance del nivel de severidad; mientras que con las señales de emisión acústica resulta complejo identificar el tipo de fallo en el

engrane, pero con esta técnica se puede determinar como la severidad de los fallos va incrementando.

El monitoreo de las señales de emisión acústica es ideal para determinar la severidad de fallos por medio de técnicas de inteligencia artificial; debido a que la señal tiene mayor información que la de vibración en el dominio de la frecuencia.

REFERENCIAS

Ali, Y. H., Rahman, R. A., & Hamzah, R. I. R. (2014). Acoustic emission signal analysis and artificial intelligence techniques in machine condition monitoring and fault diagnosis: a review. *Jurnal Teknologi*, *69*(2), 121–126.

Chaari, F., Fakhfakh, T., & Haddar, M. (2009). Analytical modelling of spur gear tooth crack and influence on gearmesh stiffness. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, *28*(3), 461–468.

Degala, S. (2008). *Acoustic emission monitoring of reinforced concrete systems retrofitted with CFRP*. University of Pittsburgh.

Devendiran, S., & Manivannan, K. (2016). Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, *11*(6), 3966–3975.

Ebersbach, S., Peng, Z., & Kessissoglou, N. J. (2006). The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques. *Wear*, *260*(1), 16–24.

Ferrando Chacon, J. L. (2015). *Fault detection in rotating machinery using acoustic emission*. Brunel University London.

Galar, D., Thaduri, A., Catelani, M., & Ciani, L. (2015). Context awareness for maintenance decision making: A diagnosis and prognosis approach. *Measurement*, *67*, 137–150.

Guiracocha, A. R. (2015). *Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes* (B.S. thesis).

Hamel, M. A. (2013). Condition Monitoring of Helical Gears Using Acoustic Emission (AE) Technology.

Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, *20*(7), 1483–1510.

Jiang, F., Li, W., Wang, Z., & Zhu, Z. (2012). Fault severity estimation of rotating machinery based on residual signals. *Advances in Mechanical Engineering*, *4*, 518468.

Klein, M. A. (2009). *An experimental investigation of materials and surface treatments on gear contact fatigue life*. The Ohio State University.

Lei, Y., & Zuo, M. J. (2009). Gear crack level identification based on weighted K nearest neighbor classification algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *23*(5), 1535–1547.

Liang, X., Zuo, M. J., & Hoseini, M. R. (2015). Vibration signal modeling of a planetary gear set for tooth crack detection. *Engineering Failure Analysis*, *48*, 185–200.

Liou, J. J. (2010). *A theoretical and experimental investigation of roller and gear scuffing*. The Ohio State University.

Mba, D., & Rao, R. B. (2006). Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures.

Naumann, J. (2016). *Acoustic Emission Monitoring of Wind Turbine Bearings*. University of Sheffield.

Non-Destructive, T. J. S. for. (2016). *Practical Acoustic Emission Testing*. Springer.

Pao, Y.-H., Gajewski, R. R., & Ceranoglu, A. N. (1979). Acoustic emission and transient waves in an elastic plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *65*(1), 96–105.

Sánchez, R. V. (2018). *Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración,*

corriente y emisión acústica. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

Scheer, C., Reimche, W., & Bach, F.-W. (2007). Early fault detection at gear units by acoustic emission and wavelet analysis. *J. Acoust. Emiss*, *25*, 331–340.

Sharma, A., Amarnath, M., & Kankar, P. K. (2016). Feature extraction and fault severity classification in ball bearings. *Journal of Vibration and Control*, *22*(1), 176–192.

Sharma, V., & Parey, A. (2017). Frequency domain averaging based experimental evaluation of gear fault without tachometer for fluctuating speed conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *85*, 278–295.

Sidorova, A. (2010). *Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Starzhinskii, V. E., Soliterman, Y. L., Goman, A. M., & Osipenko, S. A. (2008). Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention. *Journal of friction and wear*, *29*(5), 340–353.

Toutountzakis, T., & Mba, D. (2003). Observations of acoustic emission activity during gear defect diagnosis. *NDT & E International*, *36*(7), 471–477.

Wang, D., Tsui, K.-L., Tse, P. W., & Zuo, M. J. (2015). Principal components of superhigh-dimensional statistical features and support vector machine for improving identification accuracies of different gear crack levels under different working conditions. *Shock and Vibration*, *2015*.

Yoon, J., & He, D. (2015). Planetary gearbox fault diagnostic method using acoustic emission sensors. *IET Science, Measurement & Technology*, *9*(8), 936–944.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DEL SENSOR DE EMISIÓN ACÚSTICA EN UNA CAJA DE ENGRANAJES

METHODOLOGY FOR EMPLACEMENT THE EMISSION ACOUSTIC SENSOR IN A GEARBOX

Ing. Edison Pacheco[*], PhD. Vinicio Sánchez Loja[*], PhD Diego Cabrera[*], PhD. Mariela Cerrada[*].

[*] **GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana**,
Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca, Azuay, Ecuador.
E-mail: epachecoc@est.ups.edu.ec, renevinicio@gmail.com, dcabrera@ups.edu.ec, cerradam@gmail.com

Resumen: Este trabajo tiene como objetivo identificar la mejor posición de un sensor de emisión acústica en una caja de engranajes para la detección de fallos. El sensor de emisión acústica fue localizado en las cuatro paredes laterales de la caja de engranajes, donde se adquirió tres señales en cada posición para finalmente ser analizadas en el dominio del tiempo mediante indicadores de condición. Como resultados se obtuvo que el sensor debe ser posicionado en las partes laterales de menor longitud de la caja de engranajes.

Palabras clave: Emisión acústica, monitoreo de la condición, cajas de engranajes, indicadores de condición.

Abstract: This paper aims to identify the best position of a acoustic emission sensor in a gearbox. The acoustic emission sensor was positioned at different points throughout the gearbox, where three signals were acquired in each position to be finally analyzed in the time domain by means of condition indicators. As a result, it was obtained that the sensor should be positioned on the side parts of the gearbox.

Keywords: Acoustic emission, condition monitoring, gearbox, condition indicators.

1. INTRODUCCIÓN

Las Emisiones Acústicas (EA) se pueden definir como ondas elásticas transitorias generadas por la liberación rápida de energía causada por la deformación o un fallo en la superficie de un material (Pao *et al.*, 1979). Dentro del monitoreo de la condición (MC) en maquinaria rotativa, las EA se definen como ondas transitorias generadas por la interacción de dos elementos en movimiento relativo, estas pueden ser causadas por impacto, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, pérdida de material, cavitación, fugas, entre otras (Mba & Rao, 2006).

1.1. Fuentes de emisión acústica

La actividad se produce cuando el material experimenta nuevos cambios relacionados con la deformación y la propagación de una fractura debido a que las tensiones locales son superiores a los niveles de tensión originales. La amplitud puede variar enormemente dependiendo tanto del mecanismo de deformación que se esté

produciendo y de las propiedades del material. En la *Tabla 1* se enumeran los factores que determinan la amplitud de un evento de EA (Naumann, 2016).

Tabla 1: Factores que afectan la amplitud EA (Naumann, 2016).

Factores que incrementan la amplitud EA	Factores que decrecen la amplitud EA
Alta resistencia	Baja resistencia
Baja temperatura	Alta temperatura
Propagación de grietas	Deformación plástica
Materiales fundidos	Materiales forjados
Perfiles gruesos	Perfiles finos
Tamaño de grano grande	Tamaño de grano pequeño

1.2. Principio físico del sensor de EA

El sensor de EA más común se realiza añadiendo un elemento piezoeléctrico dentro de una carcasa protectora tal como se muestra en la *Fig. 1*. Fue fabricado por Beattie en 1983. Estos sensores se basan exclusivamente en el efecto piezoeléctrico (Zurita Millán, 2013).

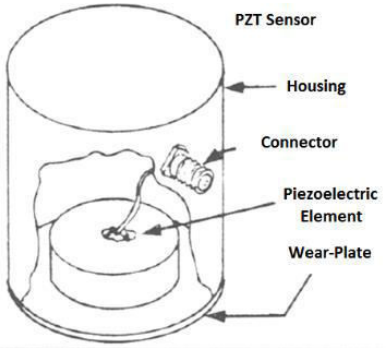


Fig. 1. Sensor de EA hecho de material piezoeléctrico (Zurita Millán, 2013).

El material piezoeléctrico es sensible a la energía de la onda y genera una tensión proporcional a través del conector. La principal diferencia entre los sensores de vibración y los de EA es el rango de frecuencia de trabajo, por ejemplo, la frecuencia de trabajo de los sensores de vibración está entre 1 Hz y 20 kHz, sin embargo, los sensores de EA funcionan entre 20 kHz y 1 MHz. Por lo tanto, los sensores de EA son mas sensibles a altas frecuencias (Zurita Millán, 2013). La tensión generada por los sensores EA es de muy baja amplitud (uV o pocos mV). Por esta razón, es necesaria una etapa de amplificación de la señal, las ganancias mas comunes que se utilizan para amplificar las señales de EA son 20 dB, 40 dB y 60 dB dependiendo de la amplitud de la fuente (Ferrando Chacon, 2015).

1.3. Atenuación

La atenuación ocurre en el tiempo y espacio. El primero se relaciona con el movimiento en serie de tiempo de un material y generalmente se denomina amortiguación viscosa. Mientras que el espacio produce una amortiguación de la amplitud con la distancia y se denomina atenuación de distancia. A medida que la onda EA se propaga desde su fuente, su amplitud disminuye debido a la atenuación, tal como se ilustra en la *Fig. 2*. Por lo tanto, es necesario determinar las posiciones y el número de sensores de EA adecuados, dependiendo de las distancias entre los sensores (Non-Destructive, 2016).

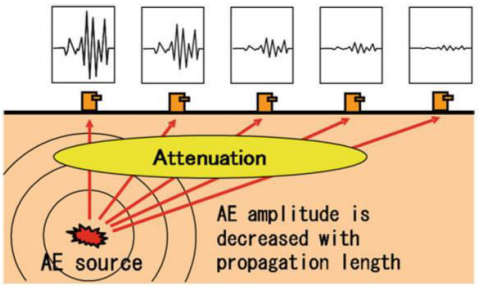


Fig. 2. Ilustración esquemática de la atenuación (Non-Destructive, 2016).

En aplicaciones de EA, la atenuación es una propiedad muy importante porque determina la intensidad de la señal en función de la distancia; por lo tanto juega un papel muy importante en la especificación de las ubicaciones de los sensores de EA (Elforjani *et al.*, 2012; Elforjani & Mba, 2008).

La atenuación se puede medir simulando una fuente de EA, esto se realiza utilizando la fuente Hsu-Nielsen o conocida comúnmente como la rotura de lápiz; esta técnica consiste en romper una punta de un lápiz de un tamaño determinado contra el material a un ángulo establecido. Las ondas de tensión producidas por la deformación del plomo son bastantes reproducibles y tienen un contenido de amplitud y frecuencia similar al de una fuente típica de grietas. Se puede crear un gráfico de atenuación realizando esta técnica a varias

distancias de un sensor y trazando la amplitud del pico contra la distancia. Tal ejercicio puede ayudar al usuario a decidir donde colocar los sensores EA para garantizar que se capturaran todos los eventos relevantes (Sidorova, 2010).

Para el presente trabajo se decidió no utilizar la fuente Hsu-Nielsen para la ubicación de los sensores de EA en una caja de engranajes, si no que se propuso una metodología que consiste en colocar el sensor de EA en diferentes puntos de la caja de engranajes y mediante indicadores de condición en el dominio del tiempo seleccionar los puntos donde hay una mejor atenuación de la señal de EA y finalmente para decidir la posición del sensor se analizó la frecuencia de engranaje en el dominio de la frecuencia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Banco de vibraciones

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana que se presenta en la *Fig. 3*, consta de todos los implementos necesarios para realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa como: desbalanceo, desalineación y combinaciones de fallos en engranes y rodamientos. El banco se conforma por cinco unidades principales: (i) unidad de mando, (ii) unidad motriz, (iii) unidad de carga, (iv) unidad de sistemas rotativos y (v) unidad de sistemas de adquisición de datos.

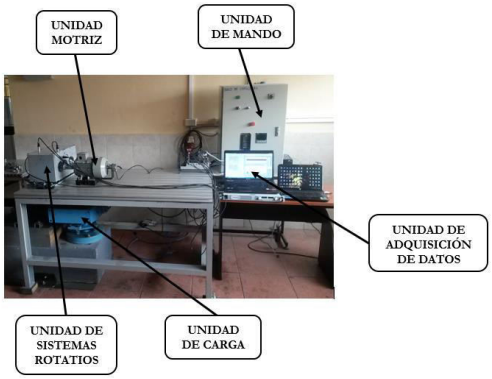


Fig. 3. Banco de la Universidad Politécnica Salesiana.

El movimiento se genera por un motor marca Siemens modelo 1LA7 096-6YA60 de 2 hp; el movimiento que se transmite hacia el eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que transmite el movimiento al freno magnético Rosati de 883 kW mediante una banda flexible, lo cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La velocidad de giro del motor es controlada por medio de un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW

Para el sistema de adquisición de datos de las señales EA son censadas por dos sensores de EA (EA1, EA2) modelo *Physical Acoustics* WD, cada señal de EA ingresa a un preamplificador MISTRAS 0/2/4C, cada señal EA es adquirida a 1 MS/s por la tarjeta NI 9223. Las señales de vibración son censadas por dos acelerómetros (A1, A2), modelo IPC 63C01, cada señal de los acelerómetros es adquirida a 50 kS/s por una tarjeta NI 9234. Las dos tarjetas NI 9234 y NI 9223 se acoplan a un chasis NI cDAQ-9188 que envía datos vía Ethernet a un computador portátil ASU ROG GL752VW-DH74 en el cual se dispone de LabVIEW para la adquisición de las señales y Matlab para el procesamiento de las señales.

La caja de engranajes se puede configurar para desarrollar pruebas en una o dos etapas, se pueden montar engranes de dientes rectos o helicoidales. Los engranes son construidos de acero E410, el número de dientes para el piñón y el engrane es de Z1=32 y Z2=48 respectivamente. El espesor de los dientes es de 20 mm, módulo de 2.25 y un ángulo de presión θ=20°. La lubricación utilizada para la caja de engranajes fue Gulf HARMONY A W ISO VG 68. La localización del fallo fue en el engrane Z1. La duración de la adquisición de cada muestra fue de 10 segundos. La frecuencia de rotación del motor fue de 6Hz (F1) y 12Hz (F2) y finalmente las cargas aplicadas fueron de 0V (L1) y 10V (L2).

2.2 Determinación de las coordenadas para ubicar el sensor EA

Los sensores de EA fueron localizados en diferentes puntos de las paredes de la caja de engranajes, en la *Fig. 4* se presenta las distintas ubicaciones del sensor, y en la *Tabla 2* se presenta

las coordenadas del sensor en la caja a de engranajes.

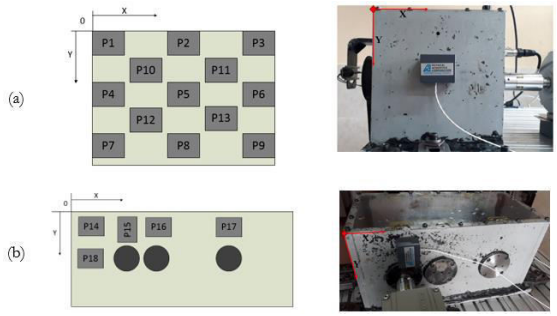


Fig. 4. (a) Ubicación del sensor EA en la parte lateral izquierda de la caja de engranajes, (b) ubicación del sensor EA en la parte frontal de la caja de engranajes.

Tabla 2: Coordenadas para la ubicación del sensor EA.

	X (mm)	Y (mm)
P1	0	0
P2	86	0
P3	170	0
P4	0	-75
P5	86	-75
P6	170	-75
P7	0	-150
P8	86	-150
P9	170	-150
P10	45	-45
P11	128	-45
P12	45	-123
P13	128	-123
P14	15	-10
P15	95	-10
P16	170	-10
P17	310	-10
P18	0	-95

2.2. Adquisición de señales de EA

Se adquirió un total de 216 señales o muestras, las cuales serán analizadas en el dominio del tiempo donde se extraerán los atributos de la señal de EA tales como: raíz media cuadrática (rms), deviación estándar, varianza, amplitud y curtosis; estos atributos ayudarán a determinar las principales ubicaciones de los sensores en la caja de engranajes. En la *Tabla 3* se presenta las mejores ubicaciones del sensor EA1 y en la *Tabla 4* se presenta las mejores ubicaciones para el sensor EA2. Estas tablas fueron obtenidas luego de haber realizado el análisis de las señales por medio de los indicadores de condición en el dominio del tiempo, y así obtener las mejores respuestas del sensor de EA en la caja de engranajes bajo las diferentes condiciones de trabajo tales como velocidad y carga.

Tabla 3: Mejor respuesta de señal del sensor EA1.

Condición	RMS	DesEst	Var	Amp	Curt.
Parte lateral izquierda					
CN	P3	P5	P4	P5	P11
VV	P3	P5	P5	P2	P11
CV	P3	P5	P4	P4	P11
VC	P3	P5	P4	P5	P11
Parte frontal					
CN	P15	P15	P15	P15	P16
VV	P15	P15	P15	P17	P17
CV	P15	P15	P15	P17	P18
VC	P15	P15	P15	P17	P18

Tabla 4: Mejor respuesta de señal del sensor EA2.

Condición	RMS	DesEst	Var	Amp	Curt.
Parte lateral izquierda					
CN	P3	P5	P5	P4	P1
VV	P3	P5	P5	P3	P5
CV	P3	P5	P4	P5	P5
VC	P3	P5	P4	P5	P5
Parte frontal					
CN	P15	P15	P15	P15	P16
VV	P15	P15	P15	P15	P18
CV	P15	P15	P15	P15	P15
VC	P15	P15	P15	P15	P16

Donde:
CN Condiciones Normales
VV Velocidad Variable
CV Carga Variable
VC Velocidad y Carga

De los resultados obtenidos en la *Tabla 3* y *Tabla 4* se procede a convertir las señales al dominio de la frecuencia, para obtener la mejor respuesta del sensor de EA; esto se determinara mediante la frecuencia de engranaje *(Gear Mesh Frequency, GMF)* la cual se puede calcular con la Ecuación (1).

$$GMF = F_g * Z_1 \ [Hz] \quad (1)$$

Donde:
Fg: Frecuencia de giro del motor [Hz]
Z1: Número de dientes del piñón

3. RESULTADOS

La GMF calculada para las diferentes velocidades de giro del motor se la identificara en la señal de EA en el dominio de la frecuencia, la amplitud de esta frecuencia incrementara donde el sensor presente una mejor respuesta a las señales EA dentro de la caja de engranajes. En la *Fig. 5* y la *Fig. 6* se presenta la señal del sensor EA1 y sensor EA2 respectivamente en la ubicación P5 para condiciones normales, en esta localización es donde se presento la GMF con mayor amplitud.

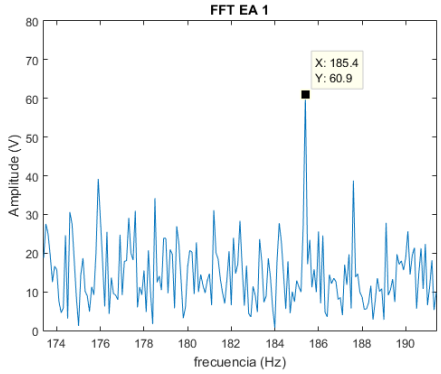


Fig. 5. Señal del sensor EA1 en la ubicación P5 para condiciones normales.

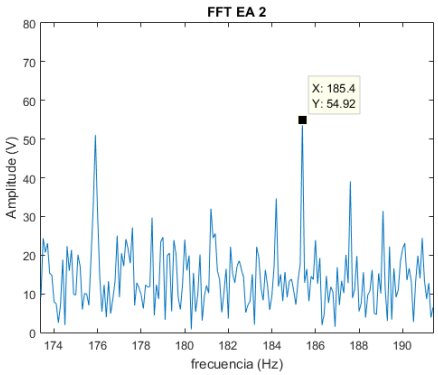


Fig. 6. Señal del sensor EA2 en la posición P5 para condiciones normales.

Con velocidad variable para el sensor EA1 se obtuvo una mejor respuesta en la ubicación P5, la cual se presenta en la *Fig. 7*; mientras que para el sensor EA2 la mejor respuesta se obtuvo en la ubicación P11 tal como se muestra en la *Fig. 8*.

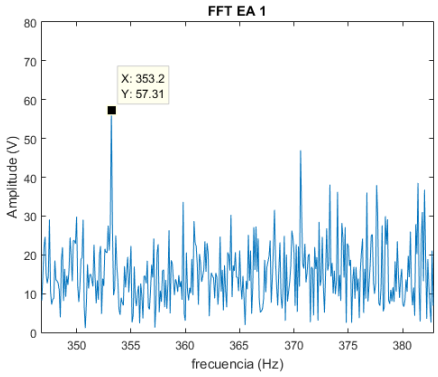


Fig. 7. Señal del sensor EA1 en la ubicación P5 para velocidad variable.

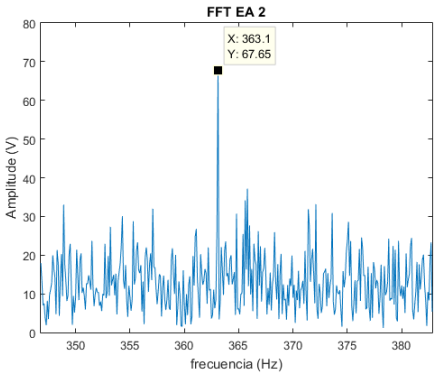


Fig. 8. Señal del sensor EA2 en la ubicación P11 para velocidad variable.

Al aplicar carga variable se obtuvo una mejor respuesta en la ubicación P5 tanto para el sensor EA1 y el sensor EA2, las señales se presentan la *Fig. 9* y *Fig. 10* respectivamente para sensor de emisión acústica.

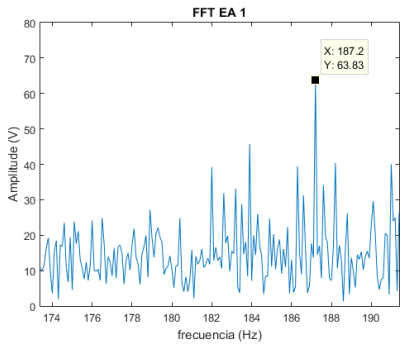


Fig. 9. Señal del sensor EA1 en la posición P5 para carga variable.

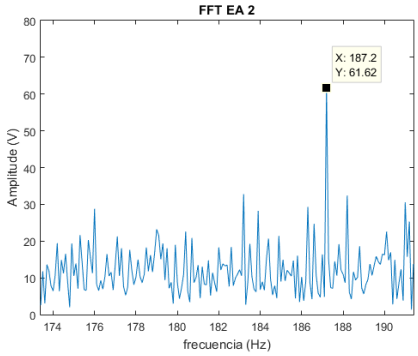


Fig. 10. Señal del sensor EA2 en la posición P5 para carga variable.

Con velocidad y carga variable para el sensor EA1 se obtuvo una mejor respuesta en la ubicación P3, la cual se presenta en la *Fig. 11*; de igual manera para el sensor EA2 la mejor respuesta se obtuvo en la ubicación P3 tal como se muestra en la *Fig. 12*.

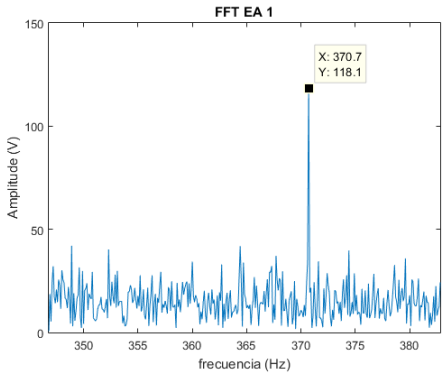


Fig. 11. Señal del sensor EA1 en la ubicación P3 para velocidad y carga variable.

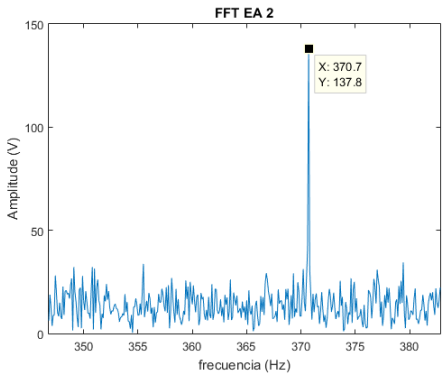


Fig. 12. Señal del sensor EA2 en la ubicación P3 para velocidad y carga variable.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Las señales de EA fueron analizadas primero en el dominio del tiempo por medio de indicadores de condición, esto con el fin de determinar las ubicaciones donde el sensor EA capta mejor las ondas elásticas en toda la caja de engranajes. Definidas estas ubicaciones se procedió a analizar las señales en el dominio de la frecuencia, el rango utilizado para el análisis fue donde se ubica la GMF.

La ubicación de los dos sensores de EA se determinó mediante el análisis de la amplitud de la GMF, para condiciones de operación de la caja de engranajes se obtuvo una mejor respuesta en la posición P5 para ambos sensores, para la velocidad variable la mejor respuesta del sensor EA1 fue en la posición P5 y para el sensor EA2 fue en la posición P11, con la aplicación de carga hacia la caja de engranaje se obtuvo una mejor respuesta en la posición P5 para ambos sensores y finalmente para carga y velocidad variable la mejor respuesta se dio en la ubicación P3 para ambos sensores.

En la ubicación P5 es donde se presenta mayor sensibilidad de los sensores EA1 y EA2, por lo tanto se concluye que la ubicación final de los sensores de emisión acústica será en los lados laterales de la caja de engranajes específicamente en la posición P5 tal como se muestra en la *Fig. 13*.



Fig. 13. Ubicación del sensor EA en la caja de engranajes: (a) lado lateral izquierda sensor EA1, (b) lado lateral derecho sensor EA2.

5. CONCLUSIONES

La emisión acústica es un tema relativamente nuevo dentro del monitoreo de la condición en maquinaria rotativa, es por esto que es de vital importancia ubicar el sensor lo más cercano posible a la fuente del fallo.

Los sensores de emisión acústica se fueron desplazando por toda la caja de engranajes, de esta manera se logro determinar las 18 ubicaciones para cada sensor.

Las señales de emisión acústica adquiridas fueron analizadas en primer lugar en el dominio del tiempo donde se verificó mediante indicadores de condición las mejores ubicaciones de los sensores, y en el dominio de la frecuencia se analizó la amplitud de la frecuencia del engranaje.

Se determinó la posición de dos sensores de emisión acústica en una caja de engranajes, estos estarán ubicados en las partes laterales de menor longitud de la misma.

Esta metodología es muy útil y eficiente al momento de determinar la posición de los sensores de emisión acústica para el diagnóstico de maquinaria rotativa.

REFERENCIAS

Elforjani, M., & Mba, D. (2008). Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in a slow speed rolling element bearing with acoustic emission. *Journal of Vibration and Acoustics*, *130*(4), 041013.

Elforjani, M., Mba, D., Muhammad, A., & Sire, A. (2012). Condition monitoring of worm gears. *Applied Acoustics*, *73*(8), 859–863.

Ferrando Chacon, J. L. (2015). *Fault detection in rotating machinery using acoustic emission* (PhD Thesis). Brunel University London.

Mba, D., & Rao, R. B. (2006). Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures.

Naumann, J. (2016). *Acoustic emission monitoring of wind turbine bearings* (PhD Thesis). University of Sheffield.

Non-Destructive, T. J. S. for. (2016). *Practical Acoustic Emission Testing*. Springer.

Pao, Y.-H., Gajewski, R. R., & Ceranoglu, A. N. (1979). Acoustic emission and transient waves in an elastic plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *65*(1), 96–105.

Sidorova, A. (2010). *Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón* (Master's Thesis). Universitat Politècnica de Catalunya.

Zurita Millán, D. (2013). Mechanical fault detection by means of AE analysis.

DETECCIÓN DE FALLOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS MEDIANTE HISTOGRAMAS DE SEÑALES ACÚSTICAS

DETECTION OF FAULTS OF ROTATING MACHINES BY HISTOGRAMS OF ACOUSTIC SIGNALS

Julio Fernando Siguencia*, PhD. Diego Cabrera*, PhD. Vinicio Sánchez*, PhD. Mariela Cerrada*

* **GIDTEC,** Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
Tel.:(593) 72862213 Ext. 1192
E-mail: {jsiguencia,dcabrera,rsanchezl,mcerrada}@ups.edu.ec.

Resumen: Las máquinas rotativas sufren desgaste de sus componentes por su normal funcionamiento, por tanto, con el pasar del tiempo están expuestas a fallos. La identificación temprana o predicción de dichos fallos complementa el proceso de mejora continua de productividad. En este trabajo se propone un método de comparación de histogramas de señales acústicas que permite discriminar entre un estado de funcionamiento normal y uno con fallo. Las señales acústicas de estado normal se almacenan como vectores de soporte, con el objetivo de generar una firma de condición normal como un perfil de histograma patrón. Los histogramas de las nuevas señales a evaluar son comparados con el patrón mediante un factor de similitud basado en el área bajo la curva de la intersección de los histogramas. La disimilaridad finalmente se propone como un indicador de fallo de la máquina. La evaluación del método da como resultado un desempeño de 9.2% de similitud para el experimento con un fallo severo de la máquina, para el experimento en condiciones normales un desempeño de 20.2% de similitud. Estos resultados indican cierta variación que permite determinar fallos en rodamientos y engranajes ante diferentes condiciones de velocidad.

Palabras clave: Área de intersección, Vector de soporte, Vibración, Señal Acústica.

Abstract: The rotating machines suffer wear of their components due to their normal operation, therefore, with the passing of time they are exposed to failures. The early identification or prediction of such failures complements the process of continuous improvement of productivity. As a maintenance technique, a method of comparing histograms of acoustic signals is proposed, which makes it possible to discriminate between a normal operating state and a faulty one. The acoustic signals of normal state are stored as support vectors, with the aim of generating a normal condition signature as a standard histogram profile. The histograms of the new signals to be evaluated are compared with the pattern by a similarity factor based on the area under the curve of the intersection of the histograms. Dissimilarity is finally proposed as an indicator of machine failure. The evaluation of the method results in a performance of 9.2% similarity for the experiment with a severe failure of the machine, for the experiment under normal conditions a performance of 20.2% similarity. These results indicate some variation that allows determining failures in bearings and gears in different speed conditions.

Keywords: Intersection area, Vector support, Vibration, Acoustic signal.

1. INTRODUCCIÓN

La detección de fallos en máquinas rotativas basada en datos mediante técnicas estadísticas y de modelamiento son implementados en ciertas herramientas de control y monitoreo industrial con el fin de optimizar las tareas de mantenimiento y mejorar tiempos de producción. Varias investigaciones aportan con distintas metodologías basadas en: análisis de señales de vibración mecánica(Li et al. 2016), procesamiento digital de imágenes termográficas(Widodo et al. 2012), pruebas estadísticas de características de señales(Pacheco et al. 2016), aprendizaje automático(Cerrada et al. 2017), etc.

Por ejemplo X. Ren en (Ren et al. 2005), utiliza una metodología basada en FDI (Fault Detection Isolation) que se divide en dos pasos: generación residual y evaluación residual. La generación residual es un proceso donde la entrada y la salida de un sistema se supervisan y manipulan para generar una señal residual. El residuo es normalmente cercano a cero cuando no hay falla presente, y diferente de cero cuando ocurre una falla. La decisión es tomada en base al conocimiento sobre el proceso y los síntomas.
Otra metodología para el diagnóstico de fallos se presenta en (Verma et al. 2014), donde proponen una aplicación móvil para realizar monitoreo basado en la condición de máquinas industriales. La aplicación utiliza grabaciones acústicas y técnicas de minería de datos para el reconocimiento de estados defectuosos de un estado saludable de la máquina.

Similar a la metodología antes expuesta, en (Orman et al. 2015), proponen la detección de fallos de rodamientos de motores eléctricos con el uso de señales acústicas captadas por un dispositivo móvil. En esta investigación se realiza un análisis de las señales acústicas en el domino de la frecuencia con el fin de identificar espectros de frecuencia correspondientes a los fallos de rodamientos.

Por otro lado, basándose en análisis de señales de vibración en (Medina et al. 2017), proponen una metodología para el diagnóstico de fallas en cajas de engranajes utilizando características extraídas del diagrama de Pointcaré de la señal de vibración. Las características extraídas son utilizadas para la clasificación de fallos registrados en el conjunto de datos de la señal de vibración en la caja de engranes, utilizando una Máquina de Vectores de Soporte multi-clase.

El trabajo de investigación presentado en (Cabrera et al. 2017), propone un modelo basado en computación con reservorios, inferencia variacional y Deep learning para un buen aprendizaje de distribuciones de probabilidad de series temporales adquiridas a partir de mediciones de un sistema dinámico. La metodología propuesta permite generar modelos para la detección de fallos de máquinas rotativas de forma rápida y eficiente.

En este trabajo se propone una metodología para detección de fallos de máquinas rotativas mediante la comparación de histogramas de señales acústicas. Los histogramas son generados a partir de señales en estado saludable y defectuoso de la máquina. Por medio de la comparación se obtiene el área de intersección de histogramas para generar un factor normalizado entre 0 y 1 que indique si la máquina presenta o no un fallo en su funcionamiento. Este articulo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se da a conocer los conceptos aplicados en la metodología propuesta, en la sección 3 se presenta la metodología utilizada para la detección de fallos en máquinas rotativas, en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos y por último en la sección 5 las conclusiones del trabajo.

2. FUNDAMENTOS

En este apartado se hace una revisión del tratamiento de señales acústicas para el proceso de inferencia del estado de la máquina. Además, se presenta el algoritmo utilizado para encontrar el área de intersección entre el histograma de un patrón de señal en estado normal y el histograma de una señal con fallo de la máquina.

2.1 Vectores de soporte

Para la detección de fallos a través del sonido es indispensable disponer de un conjunto de señales de la máquina funcionando en buenas condiciones. A cada elemento de este conjunto se le ha

denominado vector de soporte por ser la única información disponible para soportar el modelado de la máquina y la identificación de su estado. Una forma gráfica de representar dichos vectores se observa en la Figura 1 donde cada punto representado en el plano cartesiano hace referencia a una señal.

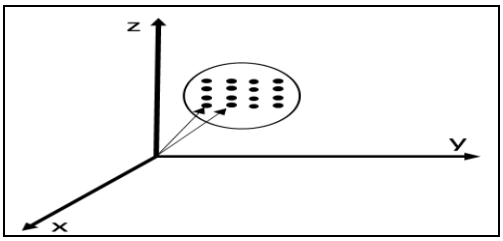


Fig. 1 Representación de vectores de soporte en el plano x,y,z.

2.2 Medidas estadísticas para detección de fallos

Los parámetros estadísticos son índices confiables para extraer información de la condición de las máquinas. La metodología aplicada dependerá del tipo de datos que se adquiera. La mayor parte de investigaciones para la detección de fallas en máquinas rotativas utilizan señales de vibración y acústicas. La información aportada tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia permiten determinar condiciones anómalas.

Por ejemplo, estas medidas estadísticas fueron aplicadas para implementar un sistema de identificación y clasificación de fallas de una caja de engranajes mediante redes neuronales convolucionales. La desviación estándar, la asimetría y la curtosis evaluadas en las señales de vibración se usaron para entrenar y probar la red neuronal convolucional implementada(ZhiQiang Chen et al. 2015).

Otro caso particular en (Zhiqiang Chen et al. 2015), proponen un diagnóstico de fallas en una caja de engranajes mediante redes neuronales multicapa. Las señales de vibración obtenidas en el dominio del tiempo generalmente cambian cuando se produce una falla. Entonces utilizaron valores estadísticos como el valor RMS para representar la amplitud de la vibración y la energía en el dominio del tiempo. Los valores de la desviación estándar, asimetría y curtosis para representar la distribución de la serie temporal de una señal de vibración en el dominio del tiempo. Estos valores se usaron como parámetros de entrada para la red neuronal multicapa.

2.3 Algoritmo de intersección del histograma

En el trabajo de (Swain & Ballard 1991) se propone el algoritmo de intersección del histograma donde demuestran que los histogramas generados a partir de imágenes de objetos multicolores proporcionan información robusta y eficiente para generar un modelo de referencia. El histograma es una representación gráfica de la distribución del valor de una imagen digital es decir la apariencia del color de dicha imagen. La base matemática para representar el algoritmo de intersección se define como:

$$C(I,M) = \sum_{j=1}^{n} \min(I_j, M_j) \quad (1)$$

Donde representa el histograma de entrada y el histograma modelo o de referencia. La variable representa el número de bins que contienen los histogramas.

Para obtener el valor normalizado entre 0 y 1 la expresión (1) se divide para la sumatoria de bins del histograma modelo, como se observa a continuación:

$$H(I,M) = \frac{\sum_{j=1}^{n} \min(I_j, M_j)}{\sum_{j=1}^{n} M_j} \quad (2)$$

3. METODOLOGÍA

Las máquinas rotativas producen un sonido específico de funcionamiento, debido al movimiento o rozamiento de sus componentes. Un síntoma de fallo puede alterar las señales acústicas que genera y a razón del alto nivel de sonido que produce la máquina en ocasiones no puede ser detectado por audición humana. Para solventar este problema se propone una metodología no invasiva para identificar posibles fallos mediante la adquisición y procesamiento de señales acústicas de la máquina, la cual es presentada en la Figura 2.

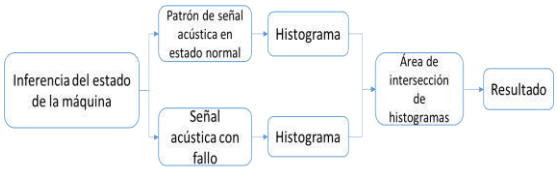


Fig. 2 Diagrama de flujo de la metodología propuesta para detección de fallos.

A continuación, se detalla cada uno de los bloques expuestos en la Figura 2.

3.1 Patrón de señal acústica en estado normal

Luego del proceso de adquisición de señales acústicas se crea una base de datos con el objetivo de generar un perfil de histograma común, que sirva como referencia de un estado de funcionamiento normal de la máquina. Este proceso se lleva acabo concatenando cada señal almacenada y obteniendo un solo vector de soporte total. Además, se obtiene el valor de la media y desviación estándar del vector de soporte total, que indicará un valor promedio y el valor de dispersión de los datos que contiene dicho vector. En la Figura 3 se puede observar el diagrama de flujo del procesamiento de la señal.

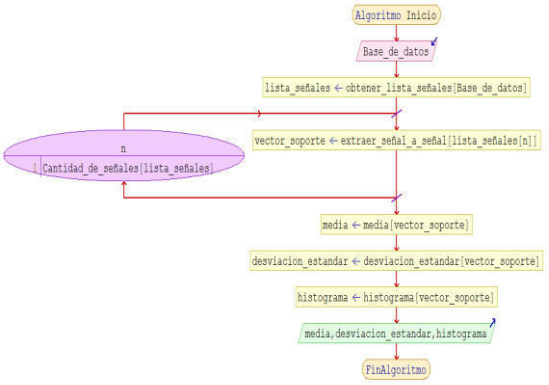


Fig. 3 Flujograma del procesamiento de vectores de soporte.

3.2 Señal acústica con fallo

Se toma una nueva señal de la máquina cuando se presuma un fallo. Similar al proceso anterior se obtiene el histograma y los valores estadísticos como la media y desviación estándar de la señal acústica.

3.3 Área de intersección del histograma

La comparación entre el histograma de los vectores de soporte y de la nueva señal capturada, permiten obtener un factor de similitud. Si la variación es considerable indicará un fallo en la máquina. Para la comparación entre histogramas se utiliza el algoritmo de intersección del histograma mostrado en la sección 2.3. Se interponen los histogramas del vector de soporte total y el histograma de la nueva señal capturada para obtener el área de intersección. El valor del área es normalizado entre 0 y 1. Cuando éste valor sea cercano a 1 indicará un normal funcionamiento de la máquina y si es cercano a 0 un fallo inminente en la máquina. El flujograma del algoritmo implementado se puede observaren la Figura 4.

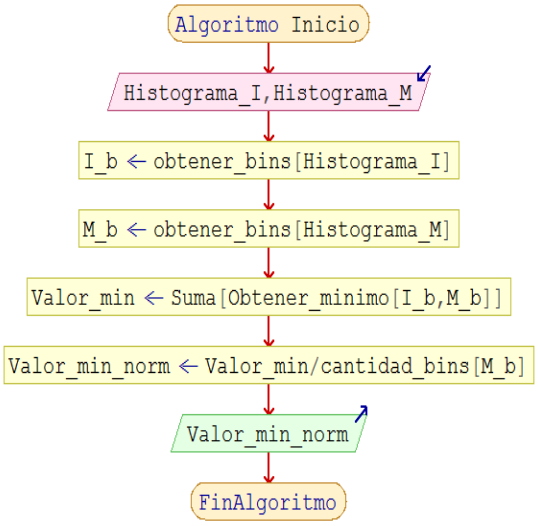


Fig. 4 Flujograma para obtener área de intersección.

4. RERULTADOS

En esta sección se presenta los resultados obtenidos en el proceso experimental. Para comprobar el funcionamiento del sistema propuesto se utilizó el banco de vibraciones perteneciente al Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales GIDTEC de la Universidad Politécnica

Salesiana. El banco de vibraciones posee 3 velocidades distintas y cada una genera un sonido diferente. Las velocidades son:

- Velocidad baja: 360 rpm
- Velocidad media: 720 rpm
- Velocidad alta: 960 rpm

4.1 Inferencia del estado de la máquina

Generadas las firmas de audio en estado de funcionamiento normal es posible obtener el estado de la máquina. Como ya se había mencionado anteriormente se realiza una comparación entre histogramas del vector de soporte total de las firmas de audio en estado normal y la señal de audio en un estado desconocido de la máquina. El nuevo estado se obtuvo al cambiar las configuraciones del banco de vibraciones para modelar un daño severo. Para el experimento se colocó piñones que presentaban crack o grietas.

Para el caso de velocidad alta, los resultados de inferencia con una señal de fallo se los puede observar en la Figura 5. Donde, las abreviaturas expuestas en la gráfica corresponden a:

- Fact_sim: Factor de similitud
- med_vs: Media del vector de soporte
- med_sf: Media de una señal con fallo

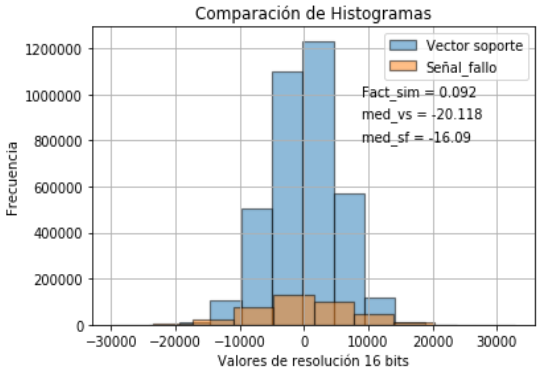


Fig. 5 Resultados de inferencia del banco de vibraciones a velocidad alta con fallo.

La Figura 6 muestra el resultado del experimento a velocidad alta del banco de vibraciones con una señal de estado normal de funcionamiento. De igual forma se puede observar el factor de similitud, el valor de la media del vector de soporte y la media de una señal en estado normal(med_sn).

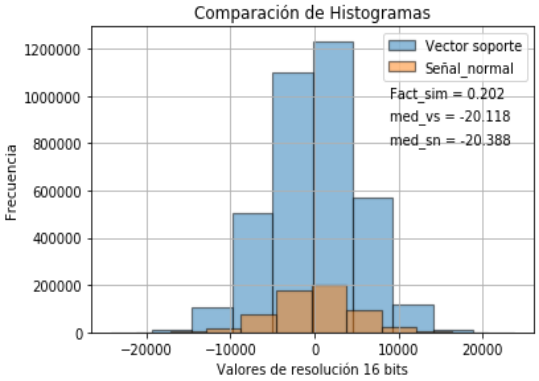


Fig. 6 Inferencia con una señal de estado normal del banco de vibraciones a velocidad alta.

4.2 Análisis de Resultados

En las gráficas obtenidas anteriormente se muestran los valores digitalizados del sonido de la máquina mediante histogramas. Además, valores estadísticos que permiten interpretar el comportamiento de las gráficas de acuerdo a los distintos escenarios experimentados. Los valores se obtienen a partir de la señal analógica temporal de audio. Digitalizando estos valores se obtiene un rango de -32768 a 32768 bits debido a que la captura de datos se la realiza con una resolución de 16 bits y una frecuencia de muestreo de 44100 Hz. La señal de audio original está compuesta por la mezcla de múltiples fuentes acústicas de los distintos componentes que conforma la máquina. Al realizar el histograma de los datos se observa que existe un comportamiento con distribución normal, debido al gran número de datos procesados con señales desde diferentes fuentes acústicas (componentes de la máquina) y obedeciendo al Teorema de Limite Central que dice “Cuando el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande, la distribución de las medias sigue aproximadamente una distribución normal”(Evans et al. 2005).

Los resultados obtenidos muestran valores favorables para identificar los fallos configurados en el banco de vibraciones. Para el experimento a velocidad alta hay una variación considerable en los valores estadísticos como se observa en la

Figura 5 y un factor de similitud igual a 0.092, siendo este valor el más cercano a cero, aseverando un fallo inminente en la máquina. La Figura 6 muestra los resultados de inferencia con una señal de estado normal a velocidad alta. El factor de similitud da como resultado 0.202, que a diferencia del caso analizado con una señal de fallo se encuentra más distante del cero e indicador de un buen funcionamiento de la máquina. Los valores estadísticos son muy cercanos entre el vector de soporte y la señal analizada.

5. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos del factor de similitud tanto para el caso de una señal de audio con fallo como para una señal de audio en estado normal muestran una diferencia mínima. En el caso de una señal en estado normal los datos almacenados superan a los datos de la señal capturada para el análisis, pero la media se mantiene y no existe una mayor variación de los datos. Sin embargo, para la inferencia de una señal con fallo se logra notar un desplazamiento de la media respecto a la media de los datos en estado normal. Este desplazamiento hace que el factor de similitud sea cercano a cero pues el área de intersección entre histogramas se reduce. Los fallos presentes en una máquina rotativa debido a desgaste, imperfección o mala lubricación, introducen valores en la señal acústica, que pueden ser notados mediante un análisis estadístico. Estos valores que modifican la media y distribución de los datos para el caso de una distribución de señales en estado normal sirven como referencia para detectar un posible fallo en la máquina.

REFERENCIAS

Cabrera, D., Sancho, F. & Tobar, F., 2017. Combining Reservoir Computing and Variational Inference for Efficient One-Class Learning on Dynamical Systems. In *2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*. IEEE, pp. 57–62. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/8181550/ [Accessed September 11, 2018].

Cerrada, M. et al., 2017. SOA Based Integrated Software to Develop Fault Diagnosis Models Using Machine Learning in Rotating Machinery. In *2017 IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*. IEEE, pp. 28–37. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/7943288/ [Accessed July 28, 2017].

Chen, Z., Li, C. & Sanchez, R.-V., 2015. Gearbox Fault Identification and Classification with Convolutional Neural Networks. *Shock and Vibration*, 2015, pp.1–10. Available at: http://www.hindawi.com/journals/sv/2015/390134/ [Accessed May 9, 2018].

Chen, Z., Li, C. & Sánchez, R.-V., 2015. *Multi-layer neural network with deep belief network for gearbox fault diagnosis*, JVE International Ltd. Available at: https://www.jvejournals.com/article/16039 [Accessed May 10, 2018].

Evans, M. (Michael J., Rosenthal, J.S. (Jeffrey S. & Tomás Morer, X., 2005. *Probabilidad y estadística*, Reverté.

Li, C. et al., 2016. Fault diagnosis for rotating machinery using vibration measurement deep statistical feature learning. *Sensors (Switzerland)*, 16(6).

Medina, R. et al., 2017. Poincaré plot features from vibration signal for gearbox fault diagnosis. In *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. IEEE, pp. 1–6. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/8247500/ [Accessed September 11, 2018].

Orman, M. et al., 2015. Bearing fault detection with the use of acoustic signals recorded by a hand-held mobile phone. In *2015 International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. IEEE, pp. 252–256. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/7449545/ [Accessed May 16, 2018].

Pacheco, F. et al., 2016. A methodological framework using statistical tests for comparing machine learning based models applied to fault diagnosis in rotating machinery. In *2016 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)*. IEEE, pp. 1–6. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/7885715/ [Accessed September 11, 2018].

Ren, X. et al., 2005. A Service Oriented Architecture for Integration of Fault

Diagnostics. In Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 146–157. Available at: http://link.springer.com/10.1007/11423287_13 [Accessed July 5, 2017].

Swain, M.J. & Ballard, D.H., 1991. Color indexing. *International Journal of Computer Vision*, 7(1), pp.11–32. Available at: http://link.springer.com/10.1007/BF00130487 [Accessed May 22, 2018].

Verma, N.K. et al., 2014. Windows mobile and tablet app for acoustic signature based machine health monitoring. In *2014 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*. IEEE, pp. 1–6. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/7036655/ [Accessed June 16, 2018].

Widodo, A. et al., 2012. Confirmation of Thermal Images and Vibration Signals for Intelligent Machine Fault Diagnostics. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012. Available at: https://www.researchgate.net/publication/232722815 [Accessed September 13, 2018].

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

DESARROLLO DE INGENIERÍA PARA DESCARGAR EL CLINKER EN EL NUEVO GALPON

DEVELOPMENT OF ENGINEERING TO DOWNLOAD THE CLINKER IN THE NEW GALPON

PhD. Luis Orlando Cotaquispe Zevallos*.

* **Pontificia Universidad Católica del Perú,** Facultad de Ciencias e Ingeniería.
Av. Universitaria 1801, Lima, Lima, Perú.
Teléfono: (511) 6262000.
E-mail: lcotaqu@ pucp.edu.pe

Resumen: El alcance del proyecto para el transporte y descarga del Clinker al nuevo Galpón en la planta de Otavalo – Quito de UNACEM – Ecuador, se logró optimizando el diseño relacionado con el circuito del Clinker a través de una faja transportadora de 36", una torre estructural vertical porta ducto de descarga y la cimentación de la Torre (ver figura). Por lo tanto, se diseñó el circuito óptimo para un traslado seguro y eficiente para las cargas actuantes sobre los diversos equipos, en particular sobre la celosía porta faja transportadora del circuito que se observa en la figura; además la ubicación de los soportes de apoyo y su distribución en la torre de concreto han sido críticos para el análisis por rigidez de las estructuras portantes de estos accesorios. Resulta clave señalar que para este proyecto el tema de las cargas actuantes por equipo, fue determinante para el diseño de la celosía y sus soportes, así como de la torre vertical.

Palabras clave: Diseño, carga, faja transportadora y estructuras

Abstract: The scope of the project for the transport and discharge of Clinker to the new Warehouse at the Otavalo - Quito plant of UNACEM - Ecuador, was achieved by optimizing the design related to the Clinker circuit through a 36 "conveyor belt, a structural tower vertical discharge duct and the foundation of the Tower (see figure). Therefore, the optimal circuit was designed for a safe and efficient transfer for the loads acting on the various equipment, in particular on the lattice of the conveyor belt of the circuit shown in the figure; In addition, the location of the support supports and their distribution in the concrete tower have been critical for the rigidity analysis of the supporting structures of these accessories. It is key to point out that for this project the issue of loads acting on equipment was decisive for the design of the lattice and its supports as well as the vertical tower.

Keywords: Design, load, belt transporter and structures.

1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de la Ingeniería de Diseño resulta importante definir los procesos generales de funcionamiento del proyecto referidos a la Faja transportadora, a la Torre vertical y al Cajón de descarga colocado por la parte de afuera de la Torre, con lo cual se pueden determinar las cargas actuantes sobre las estructuras

2. DATOS DEL PROYECTO

Luego de analizar la información recibida, así como los planos referentes a la zona en donde se desarrollará el proyecto se procedió a realizar la proyección acerca del volumen del trabajo solicitado con la finalidad de definir el alcance del proyecto del transporte y descarga del Clinker al nuevo Galpón en la planta de Otavalo – Quito de UNACEM – Ecuador, relacionado con el análisis y cálculo estructural de la celosía para la faja transportadora de 36", Torre vertical porta ducto de descarga y la cimentación de la Torre (ver figura 1)

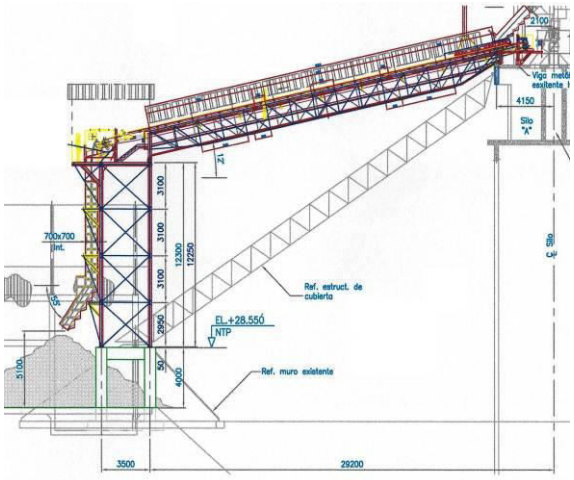


Fig. 1. Diseño final del circuito de transporte Clinker al nuevo Galpón

Resulta claro que, para poder entender el circuito del tránsito óptimo presentado por el equipo de diseño y aprobado por los responsables de la planta, se requiere además de una serie de componentes necesarios y complementarios para garantizar el flujo del transporte del Clinker al nuevo Galpón.

2.1 Faja Transportadora

En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis del sistema de cargas en el plano de elevación X– Z de la celosía de apoyo para la faja.

Tabla 1: Datos de la Faja de 30"

Equipo	Tipo de Bastidor	*B* (mm)	Angulo (β)	*L* (m)	R_2 (Ton)	R_{silo} (Ton)
Faja 30"	Celosía	760	- 12°	25.7	12.28	9.60

2.2 Torre vertical

A continuación, se presenta el resultado en función de las cargas actuantes por niveles sobre la Torre vertical:

- Carga vertical en la torre por la celosía: (12280 / 2) kg (↓) nivel N: +40.85 m.
- Carga sistema templador + polea cola: (1630 / 4) kg (↓) nivel N: +40.85 m.
- Carga viva + pasarela: (570) kg (↓) nivel N: +40.85 m.
- Carga del cajón vertical para descarga: (6500/ 4) kg (↓) nivel N: +40.85 m.

3. DISEÑO DE LA CELOSÍA ESTRUCTURAL DE LA FAJA

La faja transportadora de 30" es la que trabaja con una inclinación de -12° en la salida de la zona de descarga al ducto. En base a este funcionamiento se han evaluados y seleccionados todas las cargas que actúan sobre la celosía diseñada (ver figura 2).

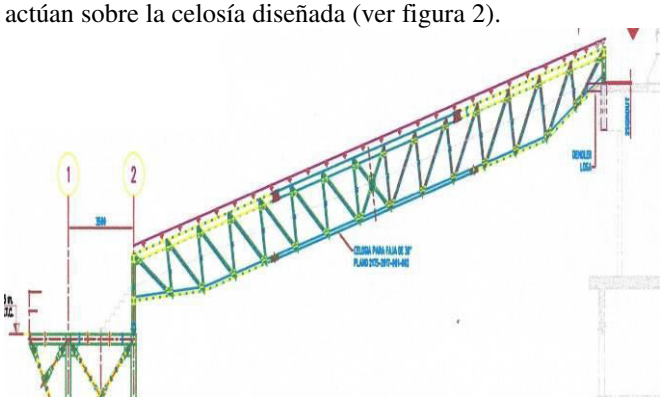


Fig. 2. Diseño estructural óptimo de la celosía

3.1 Diseño y cálculo de la Celosía

El estado desfavorable de las cargas distribuida y puntual sobre la celosía (Hibbeler, 1997) ocurre por la inclinación entre los apoyos *#2* de la Torre vertical y el apoyo para la zona del silo de concreto en donde ocurre el ingreso del Clinker. Entonces se evalúa el modelo presentado para ese caso y se obtiene finalmente las reacciones, momentos flectores y la zona crítica de la estructura denominada celosía (ver figura 2).
El diseño y análisis estructural se desarrolló con el programa de cálculo estructural (SAP 2000, V.17), para la forma constructiva típica de la celosía con 2 canales [ ] en la zona superior y con dos perfiles angulares ⌞⌟ en la zona inferior (ver figura 3).

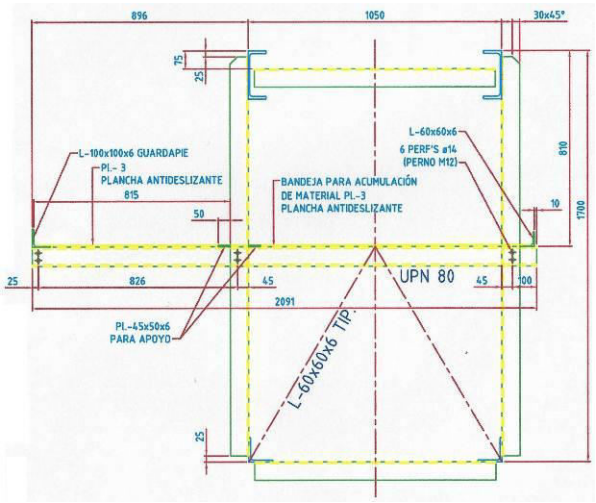


Fig. 3. Sección crítica de los componentes de la celosía estructural

Además, se evalúan los diagramas de fuerzas cortantes y del momento flector en conjunto con la finalidad de reconocer la zona más solicitada, la cual resulto estar entre los apoyos *#2* y el silo (zona central). Esta zona se evalúa por resistencia y deformación para el plano X - Z; con la finalidad de verificar el factor de seguridad y la rigidez recomendadas por la Norma Internacional ANSI (AISC-360, 2005) y la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-AC, 2015).

En la tabla 2 se presentan los resultados del análisis del sistema de cargas combinadas en el plano X – Z; considerando como sección típica de la celosía, la que se muestra en la figura 3.

Tabla 2: Estado de cargas combinado

Tipo de Bastidor	Angulo (β)	A_T (m^2)	I (m^4)	V (ton)	M_{centro} (ton x m)
Celosía	- 12°	0.043	0.0179	18331	235.6

Entonces se tiene un sistema de cargas combinadas el cual será resuelto por la teoría de Von Mises (VM) el resultado de reemplazar los valores de la tabla 2 para el esfuerzo equivalente se muestran en la tabla 3

Tabla 3: Factor de seguridad carga combinada

Tipo de Bastidor	τ_{CT} (kg/mm^2)	σ_f (kg/mm^2)	σ_e (kg/mm^2)	$\sigma_{F\ adm.}$ (kg/mm^2)	FS
Celosía	1.11	10.98	11.15	25.00	2.24

Es importante señalar que para terminar de analizar esta zona central referida al plano X - Z, se deben de considerar las deformaciones originadas por la carga actuante y definir la rigidez de la celosía en el plano de estudio. Este análisis está basado en el tipo de carga evaluado anteriormente el cual ha servido para hallar la deformación crítica total sobre la estructura tipo celosía en la zona central (ver tabla 4).

Tabla 4: Rigidez de la celosía en zona central

Tipo de Bastidor	L (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	δ_T (mm)	$R_T = \delta_T / L$	$R_T \leq R_{ASTM}$
Celosía	25700	17.24	8.39	25.63	0.00099	≤ 0.001

3.2 Cálculo del soporte crítico

El soporte del apoyo *#2* forma parte del extremo de la vigueta por lo tanto debe ser evaluado a pandeo estructural para la reacción de R_2 que se muestra en la tabla 1 y en la figura 4.
Además en la tabla 5 se presenta el análisis por pandeo estructural (DIN 4114, 1990) de las dos columnas soporte de apoyo *#2*; las cuales soportan una carga total de 14.5 toneladas entre los 2 apoyos.

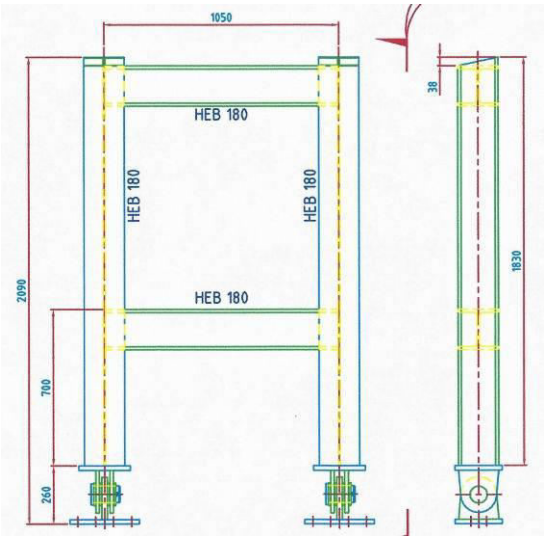


Fig. 4. Diseño estructural del soporte crítico # 2

Tabla 5: Cálculo por pandeo del soporte # 2

$L_P = L$ (mm)	λ	ω	σ_c kg/mm^2	σ_c x ω kg/mm^2	$\leqq\sigma_{adm}$ kg/mm^2	*FS*
2000	44	1.09	1.11	1.21	14	11.6

3.3 Cálculo del apoyo critico # 2

Para realizar el análisis del soporte o apoyo crítico resulta oportuno observar las figuras 5 y 6; las cuales son las vistas detalladas de los componentes que conforman el apoyo #2;

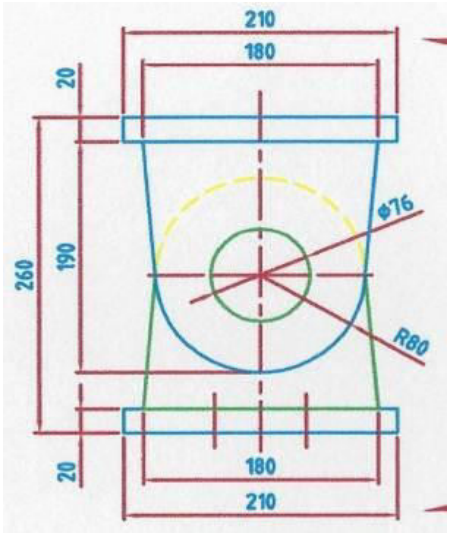


Fig. 5. Diseño del apoyo crítico # 2

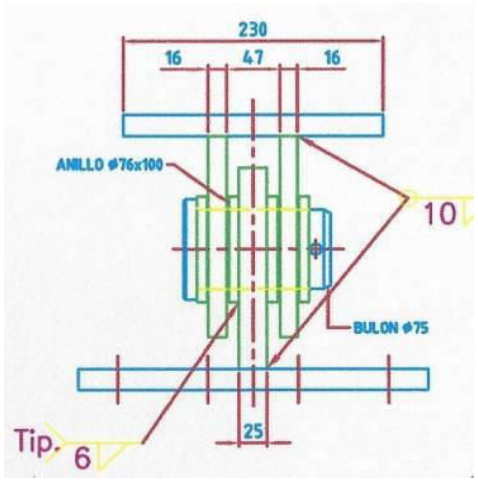


Fig. 6. Diseño de las placas del apoyo # 2

El esfuerzo cortante que soporta el pin de conexión del apoyo *#2* debe verificarse para la carga actuante por apoyo la cual es de $F_c = 7250$ kg, entonces para el pin de material acero CK 45 que se presenta en la figura 7 se tiene que el esfuerzo cortante será:

$$\tau_c = \frac{F_c}{A_c} = \frac{7250}{4418} = 1.64\ kg/mm^2 \quad (1)$$

Como se observa al aplicar la ecuación (1) el valor de $\tau_c \ll \tau_F = 21\ kg/mm^2$ tabulado; resultó bastante menor al recomendado por la Norma DIN 17200.

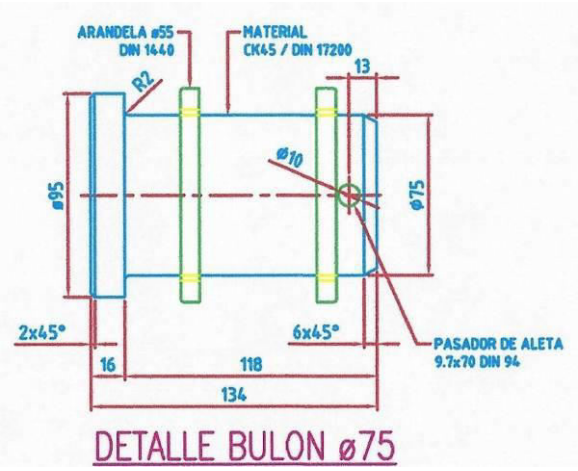


Fig. 7. Diseño del bulón o pin del apoyo # 2

4. DISEÑO DE LA TORRE ESTRUCTURAL PARA LA DESCARGA AL GALPÓN

La metodología de cálculo que se aplica sobre la Torre vertical, está en función de las cargas actuantes que generan los diversos equipos que necesitan de apoyarse sobre esta torre para poder cumplir con las funciones que garanticen un óptimo funcionamiento del proceso de descarga del Clinker en el nuevo Galpón (ver figura 8).

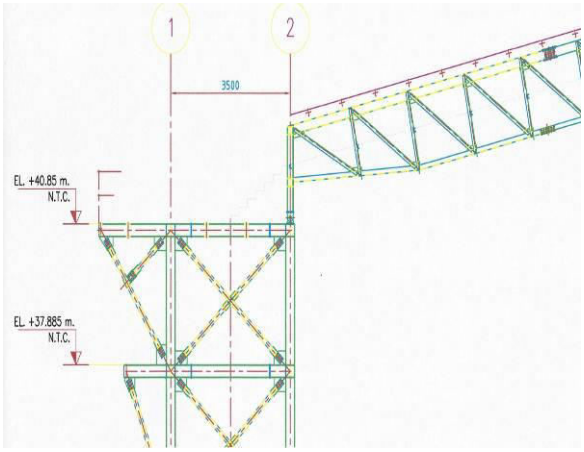


Fig. 8. Unión de la Celosía con la Torre vertical

Resaltar que estos equipos como, el apoyo de la celosía estructural, el apoyo del cajón de descarga, pisos, barandas y las maquinarias instaladas (tambor, sistema de templado y estructura portante) en la torre vertical de transferencia están a diferentes niveles de altura. Esto implica que deberá hacerse por cada nivel un análisis de cargas más crítico, para poder garantizar un adecuado equilibrio ante las cargas externas actuantes y las cargas internas soportantes (ver figura 9). La Torre vertical pesa 8.3 ton y las columnas son del perfil resultante IPE 270 de área igual a 4590 mm^2.

En general las estructuras metálicas diseñadas están unidas por tornillos acerados (VDI 2230, 1990) para facilitar su transporte y montaje de los componentes en obra.

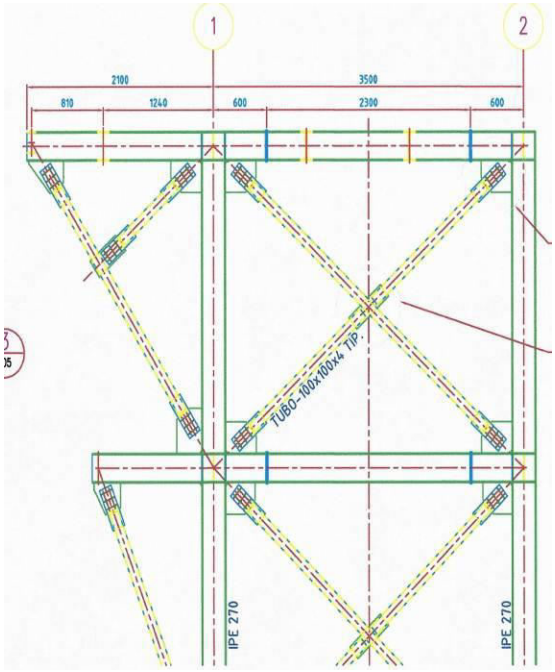


Fig. 9. Diseño de zona crítica de Torre vertical

En la tabla 6 se presenta el análisis por pandeo (método"ω") de la columna crítica de la estructura de la torre vertical, la cual es B - 2 (ver figura 10) para el nivel N: + 31.56 m.

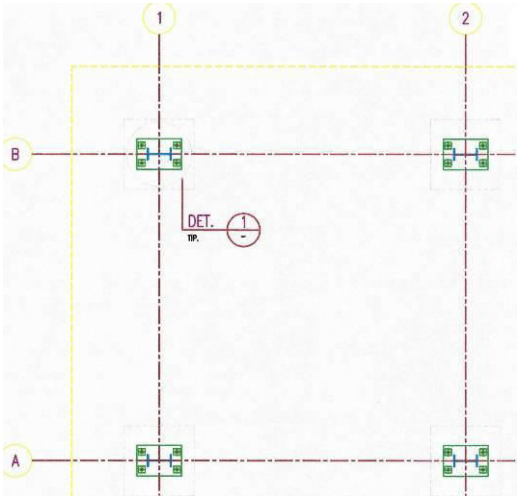


Fig. 10. Columna de apoyo crítica B-2 de la Torre vertical

Tabla 6: Cálculo por pandeo de la columna B-2

$L_P = L$ (mm)	λ	ω	σ_c (kg/mm^2)	σ_c x ω (kg/mm^2)	$\leqq\sigma_{adm}$ (kg/mm^2)	*FS*
3100	103	1.79	1.86	3.33	14	4.2

4.1 Diseño de los marcos de la Torre vertical

El DCL de los marcos para los niveles N: +40.85 y N: +37.89 se presentan en las figuras 11 y 12; en donde se colocan las cargas críticas señaladas en la data general anterior con la finalidad de evaluar su resistencia al esfuerzo y deformación bajo cargas de trabajo. Para terminar de analizar las estructuras soportes de las plataformas en los niveles indicados se deben considerar las deformaciones originadas por las cargas actuantes y definir la rigidez de la plataforma (McCormac, 1980). Estos análisis están basados en los tipos de cargas actuantes, los cuales por el principio de superposición de efectos de las cargas servirán para evaluar las deformaciones críticas sobre la plataforma conformada por vigas tipo IPE 270.

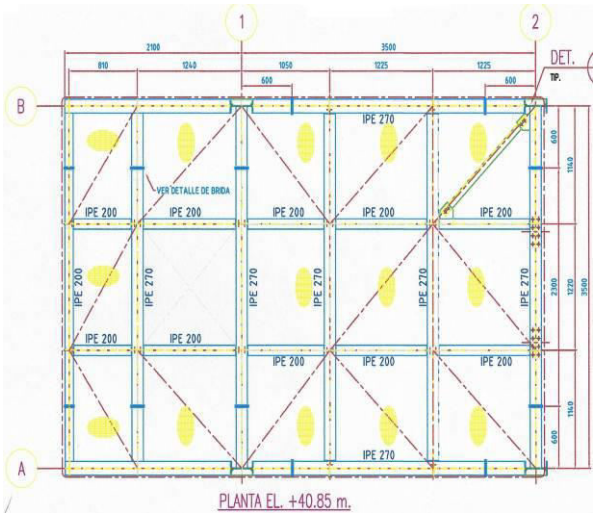


Fig. 11. Vista de la plataforma en nivel N: +40.85 m

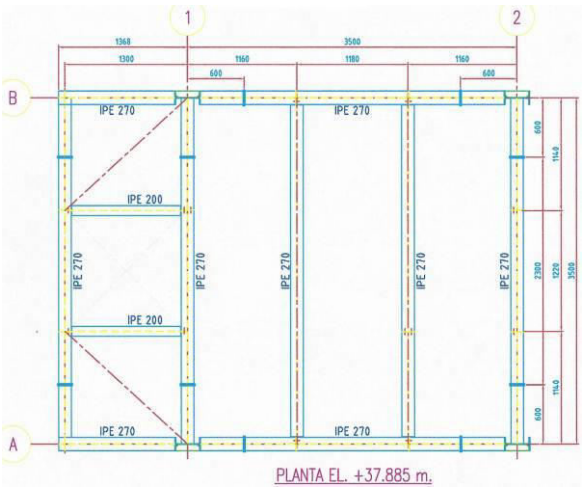


Fig. 12. Vista de la plataforma en nivel N: +37.89 m

Como se observa de los resultados en la tabla 7, el Factor de sobrecarga (*FS*) es confiable bajo cargas de trabajo, porque el valor de comparación es un esfuerzo admisible lo que significa que ya tiene un *FS* incorporado en el dato, a pesar de que no se han considerado inicialmente a las estructuras de refuerzo secundarias en sus formas constructivas.

Tabla 7: Análisis de esfuerzos de plataformas

Torre Vertical	Nivel	*M* (kg.m)	σ_f (kg/mm^2)	$\sigma_{F\ Adm}$ (kg/mm^2)	*FS*
B2 - A2	N: +40.85	8265	19.27	25	1.30
B1 – A1	N: +37.89	1056.3	5.44	25	4.59

Finalmente, en la tabla 8 se presentan los resultados del referido análisis y su comparación con la recomendación de la ASTM acerca del tema de la rigidez crítica para construcciones estructurales y cuyo valor de comparación es $R_{ASTM} = 0.001$

Tabla 8: Análisis de rigidez de plataformas

Torre Vertical	*P* (kg)	*L* (mm)	δ_1 (mm)	$R_T = \delta_1/L$	$R_T \leq R_{ASTM}$
B2 - A2	7250	3500	4.47	0.0013	0.001
B1 – A1	812.5	1300	0.92	0.0007	0.001

5. CONCLUSIONES

- El circuito de transporte del Clinker al nuevo Galpón presentado en el presente documento es el resultado del análisis técnico-económico de hasta tres circuitos preliminares.

- El cálculo de la celosía estructural se ha basado en la evaluación total de las cargas (vivas y muertas) que debe soportar por sostener la faja abarquillada de 30", manteniendo como una característica fundamental el tener que apoyarse en solo dos zonas. Es importante señalar que la forma constructiva de la Celosía estructural es dependiente de los componentes que la conforman y que por lo tanto su cálculo por resistencia y deformación ha sido clave para la seguridad, por lo tanto, el Factor de sobrecarga de 2.24 y su rigidez de 0.00099 están dentro del límite para garantizar un óptimo funcionamiento.

- La conexión de la Celosía estructural con la Torre vertical en el apoyo $\boldsymbol{R_2}$ resulta relevante para el análisis de la Torre vertical para la descarga del Clinker. Además, la Torre vertical deberá de soportar el ducto cuadrado de descarga de 6.5 ton en su periferia exterior, lo cual facilita un adecuado mantenimiento, pero esta ubicación es crítica para el diseño. El ducto cuadrado de descarga del Clinker se apoya en los 4 marcos de vigas IPE270 e IPE200 soportados por las cuatro plataformas de la Torre vertical los cuales son evaluados por resistencia y deformación, obteniéndose resultados confiables para los marcos o plataformas en las tablas 7 y 8.

- La Torre vertical soporte de apoyo de la faja abarquillada de 30" tiene un nivel crítico en donde se concentran todas las cargas señaladas (plataforma en N: +40.85 m) y además está el sistema estructural del tambor de cola de la faja, pisos de inspección y barandas. Las 4 columnas estructurales evaluadas para la carga total resultaron ser de IPE 270 y están unidas a tope con doble placa + tornillos (tipo modular) con la finalidad de facilitar su construcción y traslado. La columna por pandeo crítica resulto ser la B-2, pero el perfil seleccionado IPE 270 garantiza un factor de sobrecarga de 4.2 a compresión.

RECONOCIMIENTO

Es importante señalar el apoyo de las empresas UNACEM PERÚ y UNACEM ECUADOR en lo referente a la data de suelos en la zona de instalación del proyecto, así mismo la prontitud acerca de señalar adecuadamente los principios fijos del diseño para que el proyecto se desarrolle sin atrasos.

REFERENCIAS

Hibbeler, R. (1997). *Structural Analysis*, Editorial Prentice Hall, Inc. USA.

ACI-360. (2005). *Building Code*. Requeriments of American Institute. USA.

NEC-SE-AC. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción para Acero Estructural*. Ecuador.

DIN 4114. (1990). *Übersetzungen von DIN-Normen*. Beuth Verlag. Berlin.

VDI 2230. (1990). *Berechnung von Struktur schrauben*. Berlin.

McCormac, J. (1980). *Structural Steel Design*. Clemson University. USA.

SITIO WEB

SAP 2000. (2018). Versión 20. Interface graphycs.
www.sap2000.plataformati.microgeo.cl
› Software › CSI (cálculo estructural)

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

DESARROLLO DE CHASIS DE UN VEHÍCULO DE TRACCIÓN HUMANA, A BASE DE GUADUA Y POLÍMERO.

DEVELOPMENT OF CHASSIS OF A HUMAN TRACTION VEHICLE, BASED ON GUADUA AND POLYMER.

MSc. Juan Rodrigo Salamanca Sarmiento, MSc (C) Luis Fernando Acosta Joya MSc (C) Fabián Leonardo Higuera Sánchez, Brayan Santiago Rojas Molina (E).

Universidad Santo Tomás 1, Ingeniería Mecánica, GIDINT.
Cll. 19 Nº 11 - 64 Tunja – Boyacá, Colombia. 57 (8) 7440404.
juan.salamanca@usantoto.edu.co, luis.acosta@usantoto.edu.co,
fabián.higuera@usantotot.edu.co, brayan.rojas@usantoto.edu.co

Resumen: Un Vehículo de Tracción Humana (VTH), es un móvil que sirve para el desplazamiento y recreación de las personas. Puede tener tres o cuatro ruedas y la rueda única va en la parte de atrás.

Para lograr este objetivo, se tuvieron en cuenta aspectos como: ergonomía, peso del chasis, articulación de los sistemas de tracción, freno, dirección y silla. Para mayor rendimiento se propone el desarrollo de un chasis construido con materiales livianos y de fácil obtención, De acuerdo a lo anterior se escogió la Guadua Angustifolia Kunt, como material de soporte y el Poli Etileno de Baja Densidad (PEBD) como material de unión.

El diseño del chasis se realizó con el programa Autodesk Inventor, se realizó la validación con el programa de elementos finitos NX, posterior a esta validación, se escogieron los perfiles de guadua y se procedió a realizar los cortes y uniones con el polímero fundido en extrusora de tornillo.
Terminada la construcción del chasis, se procedió a realizar las pruebas de carga del chasis y montaje de los sistemas de tracción, dirección y silla, así como la alineación de ruedas**.**

Palabras clave: *Chasis, Tracción, Guadua, Polímero.*

Abstract: A Human Traction Vehicle (VTH), is a mobile that serves for the displacement and recreation of people. You can have three or four wheels and the single wheel goes in the back.

This objective is achieved with aspects such as: ergonomics, weight of the chassis, articulation of the traction systems, brake, steering and chair were taken into account. For greater performance, the development of a chassis built with lightweight materials and easy to obtain is proposed. Guadua Angustifolia Kunt was chosen as the support material and the Low Density Polyethylene (LDPE) as the joining material.

The design of the chassis was carried out with the Autodesk Inventor program, the

validation was carried out with the NX finite element program, after this validation, the guadua profiles were chosen and the cuts and unions with the molten polymer in extruder were made with screw molten.

Once the construction of the chassis was completed, the chassis load tests and the assembly of the traction, steering and saddle systems, as well as wheel alignment, were carried out.

Keywords: *Chassis, Traction, Guadua, Polymer.*

1. INTRODUCCIÓN

El uso continuo de polímeros en todas las actividades diarias, exige la búsqueda de productos que ayuden en la búsqueda de agentes de degradación implicados en polímeros y exposición de sus principales límites de descomposición del material (Bustamante, B. P. 2012), de esta forma se genera conciencia en las personas , para que a partir de un pequeño cambio en nuestro comportamiento, se forme una cultura de protección del ambiente, ideando nuevos usos, o usos alternativos a los polímeros desechados como el empleo de plásticos altamente inflamables como propuesta de nuevos combustibles, los cuales se usarán con tratamientos térmicos y para elementos de moldeo (Garrido Sorribes, À. 2016).

A diario se buscan nuevas alternativas a todos los productos contaminantes, se proyectan diversas actividades con fines sociales, o estudios como el de las propiedades físicas del plástico soplado o bien llamado PET para continuar legislando acerca de métodos de reciclaje y nuevos usos de este (Villafañe Calvo, I. 2018). Es así como en la técnica también se generan propuestas de nuevos usos y nuevas mezclas de polímeros con materiales reciclables, por ejemplo el uso de plástico reforzado con fibra de vidrio que presenta las mejores características de ambos combinadas entre sí, aplicados en materiales que se usan en industrias automovilísticas en formas de paneles y/o carcazas (Iglesias, M, et al .2018). También se encuentra el proceso de invención de materiales poliméricos por medio de la vitrificación o cristalización para que guarde una forma determinada, usando carbono como parte del proceso (QUÍMICO, I, et al. 2017).

La extrusión de perfiles plásticos es un proceso común, para ayudar a disminuir el impacto de los polímeros en el ambiente, pero usando PET como alternativa eficiente de reciclaje es una innovación, luego de que al realizar la comparación de las propiedades físicas entre este polímero y otros no hay diferencias marcadas. (Gómez, N, et al. 2016).

Sin embargo aunque ya existen múltiples empresas que trabajan con polímeros reciclables, es necesario que cumplan con ciertos aspectos, al igual que cualquier compañía las extrusora de plástico buscan nuevos estándares de calidad, producciones más fiables del uso de perfiles concéntricos para el recubrimiento de cables eléctricos con el fin de aislarlos (MIRÓN RASO. 2016). También se ha buscado promover empresas recicladoras y transformadoras como la propuesta de reciclaje con la implementación de trituradoras para plastico, promoviendo nuevas formas de almacenamiento mediante la reducción de tamaño de las presentaciones en las que se transforma este material (Acurio, B. et al. 2018).

Otro frente en este trabajo es la construcción de móviles y partes de chasis o motores, para lograr la fabricación de vehículos pequeños de cuatro ruedas de pedal o con motor eléctrico para ser homologado como nuevo transporte urbano (GALAN, J.2015). Pero prima la construcción de vehículos a pedal que prometen una mejor movilidad dentro de las ciudades que contaminan el medio ambiente, cuadriciclos como una

propuesta más económica (Estupiñan, S. et al 2016).

Ya en Colombia se encuentran diversos trabajos en polímeros para fabricación de vehículos de tracción humana (VTH) más amigables con el medio ambiente en zonas de difícil acceso automovilístico, propuesta económica para una población con pocos recursos económicos (García Negrete, A. et al 2018), también se busca el uso de materiales moldeados a base elementos plásticos y botellas recicladas para la fabricación de vehículos monoplaza aprovechando los beneficios ambientales y comerciales que esto proporciona (Agurto Salazar, C.2017).

A nivel institucional la Universidad de los Andes lidera una competencia de construcción y manejo de VTH, dirigida a la comunidad Universitaria de Colombia.

Este trabajo desarrolla el concepto de VTH, aplicando materiales no convencionales como soporte y unión, los cuales serán propuestos como alternativa de desarrollo y aprovechamiento en pro del medio ambiente, estos son el polímero y la guadua, luego de estudiar y revisar modelos, se logró diseñar y construir un VTH en estos materiales.

2. MATERIALES

2.1 Guadua.

La guadua empleada en este trabajo, se obtuvo de cultivos del área de Santa Ana en el departamento de Boyacá, se cortaron varas de 3 metros de largo aproximadamente, con diámetros variables de 40 mm. a 70 mm. Las muestras tomadas (20 varas), fueron almacenadas para secado durante una semana, para evitar curvado o alabeo de la guadua se dispusieron horizontalmente y fue necesario amarrar las varas a perfiles rectos de acero, luego de ese tiempo la guadua se mantiene un tanto verde, condición que facilita el doblado y las operaciones de unión.

2.2 Polietileno de Baja Densidad. (PEBD)

El polímero empleado en este trabajo, fue comprado en Color Plastic de Bogotá, con un tamaño de triturado aproximado de 5 mm., tamaño ideal para el trabajo en la extrusora. Se emplea como elemento constitutivo de las uniones de la guadua, este se introduce dentro de la guadua para la unión entre dos partes y como refuerzo se recubre el área de la unión con mas polímero

2.3 Acero. En este material están construidos los componentes auxiliares (Dirección, tracción,)

2.4 Extrusora.

El equipo empleado para realizar las uniones del chasis, es una extrusora de tornillo, con una capacidad de producción de 5 kilogramos/hora de polímero, y diámetro de salida de una pulgada.

3. ASPECTOS PARA EL DISEÑO DEL VEHÍCULO DE TRACCIÓN HUMANA(VTH)

3.1.Chasis

Es el elemento de soporte del VTH y sobre el que se anclan los sistemas de tracción, dirección y silla. De acuerdo a los antecedentes hallados, se define realizar un VTH de tres ruedas, con una rueda de gran talla en la parte de atrás y que será la de tracción, y dos ruedas medianas en la parte delantera para la instalación de la dirección, según lo anterior se debe tener en cuenta que la dirección debe incluir el ángulo de avance, ángulo de inclinación y ángulo de convergencia, de igual forma para eliminar elementos y disminuir peso, dentro del desarrollo del chasis se diseñará la silla como parte de la estructura de soporte.

3.2.Sistema de tracción

De acuerdo al diseño del chasis, la tracción se desarrolla con la rueda trasera, que es de 28 pulgadas de diámetro, además el sistema incluye elementos como: biela, pedal, piñon, plato y cadena de rodillos, ademas de guias y protectores para evitar el descarrilamiento de la cadena. El pedal se instaló, por encima del eje delantero exigiendo un sistema de tensión en la cadena.

3.3.Sistema de dirección

El sistema de dirección seleccionado se apoya en el eje delantero que es soportado por dos ruedas de 15 pulgadas.En este sistema se debieron tener en cuenta los ángulos de avance, inclinación y convergencia, para evitar fuerzas que puedan frenar

el vehículo. La dirección del VTH se instalará por debajo de la silla, con conección directa a las articulaciones de las ruedas delanteras.

3.4.Silla.

La silla que se diseñó para el VTH, es un arreglo de espuma forrada en textil, de acuerdo a las medidas que se muestran, privilegiando la espalda que exige apoyo debido a la inclinación del chasis. Como elemento de soporte, se aprovechó la inclusión de la estructura de la silla en el chasis, haciendo más fácil la instalación y eliminando espacio y peso que se pueda originar con otro diseño.

3.5 Otras consideraciones en el diseño.

3.5.1.Distancia entre ejes

Se definió la distancia entre ejes no mayor a 1,2 metros, lo anterior teniendo en cuenta la exigencia en los diámetros máximos de curva y de la misma forma se determinó que el ancho máximo sea de 90 cm.. Estas medidas se definieron de acuerdo a la Norma ASTM, que se aplica en la Carrera Nacional de VTH, organizada en Colombia por la Universidad de los Andes.

3.5.2. Distribución de cargas.

El peso del VTH debe estar distribuido a lo largo y ancho del mismo, teniendo en cuenta que una mayor concentración de peso en la parte delantera , facilita la dirección, pero dificulta la estabilidad trasera en las curvas, de la misma forma, un mayor peso en la parte delantera, genera problemas en el sistema de tracción y con aumento de velocidad puede generar volcamiento.

Por lo anterior de acuerdo al diseño el peso del VTH quedó con un ligero aumento en la parte delantera, pero esta situación se compensa con el posicionamiento del piloto en la silla que está atrás del eje central del VTH.

3.5.3. Centro de gravedad.

El VTH construido, presenta una distribución de espacios y pesos que lo hacen estable a lo largo del eje del vehículo, debido a que el cuerpo del piloto, se apoya ligeramente acostado. Con respecto a la altura, el peso se encuentra distribuido en la línea de los ejes de las ruedas, haciendo estable el movimiento con aceleración permanente.

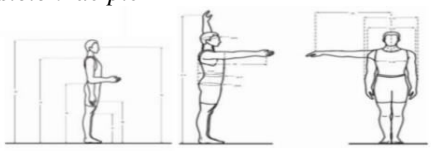
4. METODOLOGÍA

4.1.Diseño del chasis

Mediante el uso del paquete de graficación Autodesk Inventor, se realizó el diseño de un chasis para vehículo de tres ruedas, con sistema de tracción en la rueda trasera.

Las dimensiones del chasis fueron establecidas de acuerdo a las medidas antropométricas de una persona de 60 kilos de peso.

Tabla 1 Medidas antropométricas para personas en posición de pie-

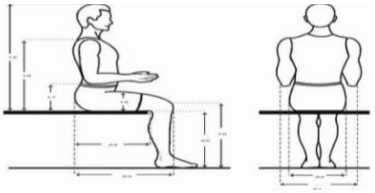


15 - 59 años						
	DIMENSIONES	$\bar{x}$	D.E.	Percentiles 5	50	90
1	Peso	72	11.69	54.55	70.00	91.25
2	Estatura	1680	60.70	1579	1682	1792
3	Altura de ojos	1564	59.32	1470	1563	1666
4	Altura al hombro	1391	55.08	1306	1386	1492
5	Altura al codo flexionado	1042	43.47	970	1038	1117
6	Altura al nudillo	755	33.97	697	754	821
7	Altura rodilla	466	28.77	414	469	505
8	Alcance lateral	766	31.03	711	768	814
9	Alcance frontal	747	36.06	685	744	821
10	Profundidad abdominal	278	34.00	226	266	347
11	Alcance máximo vertical	2045	81.86	1909	2044	2174
12	Anchura máxima bideltoidea	473	32.36	421	471	536
13	Anchura máxima del cuerpo	535	50.87	463	526	624
14	Anchura tórax	322	25.79	520	554	574
36	Perímetro de cabeza	551	15.01	710	846	1068
37	Perímetro de cintura	873	109.50	845	961	1090
38	Perímetro de cadera	969	74.88	240	256	282

Fuente:Carmenate L, 2014 Manual de medidas antropométricas

La tabla 1 presenta las medidas de una persona estando de pie, variando según el peso.

Tabla 2: Medidas antropométricas para personas sentadas.



DIMENSIONES			Percentil		
		$\bar{X}$	D.E	5	50	95
15	Altura normal sentado	876	29.56	818	884	918
16	Altura al hombro sentado	588	24.7	542	590	627
17	Altura al codo sentado	243	25.8	200	242	287
18	Altura al muslo sentado	158	16.41	125	159	185
19	Altura a la rodilla sentado	527	25.92	479	530	571
20	Altura poplítea	428	26	387	428	468
21	Anchura de codos sentado	546	50.47	459	544	638
22	Anchura de caderas sentado	383	46.11	335	374	442
23	Longitud nalga-rodilla	587	31	530	584	654
24	Longitud nalga-poplítea	474	27.88	428	470	531

Fuente:Carmenate L, 2014 Manual de medidas antropométricas

De acuerdo a la tabla se definieron las medidas así:

Tabla 3: Medidas definitivas del VTH

ELEMENTOS	VISTA		
	FRONTAL	SUPERIOR	LATERAL
Eje Principal	80 cm		
Altura Apoyo pedales	14,40 cm		
Altura Maxima	18,3 cm		
ancho refuerzo pedales		60 cm	
Ancho espaldar silla		36,3 cm	
Ancho rueda trasera		17,3 cm	
Distancia maxima chasis			46,7 cm
distancia pedales-silla			40,73 cm
Angulo inclinacion silla			75 °
Angulo inclinación pedales			45°

Fuente: Los autores

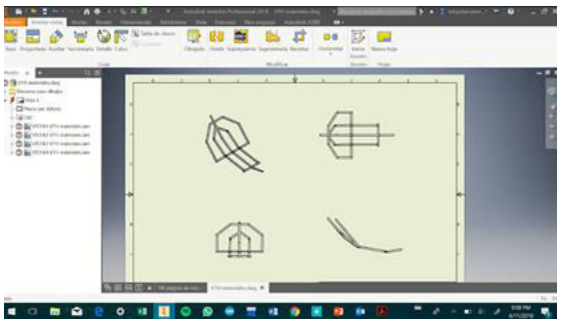
Diseño y Vistas

Figura 1: Desarrollo del diseño Inventor Autodesk



Fuente:Los autores

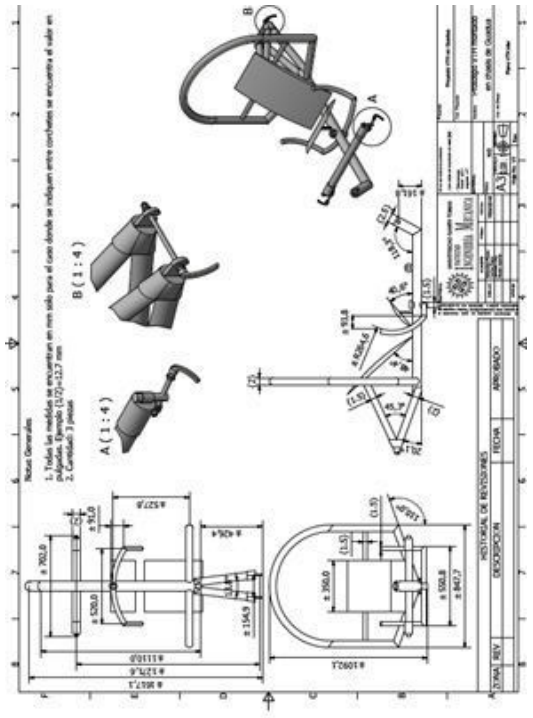
Figura 2: Vistas e isométrico del diseño de VTH



Fuente :Los autores

En la figura 1 y 2 se muestra el desarrollo del diseño mediante el programa Autodesk Inventor.

Figura 3: Plano definido del VTH



Fuente:Los autores

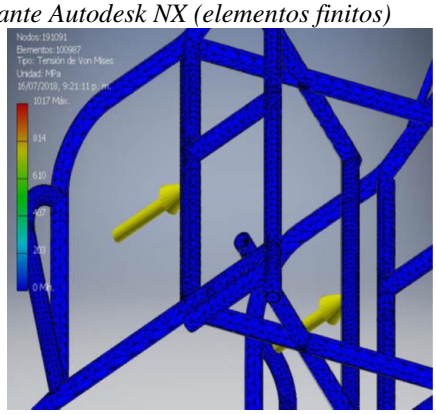
En la Figura 3 se muestra el plano definitivo del VTH con los elementos necesarios para la construcción.

Obtenido el chasis, se procede a la evaluación del diseño.

4.2. Validación de diseño del chasis.

Posteriormente se realizó la evaluación del diseño obtenido, mediante el uso del paquete de Elementos Finitos NX. Para revisar la resistencia en los puntos más expuestos a tension o compresion .

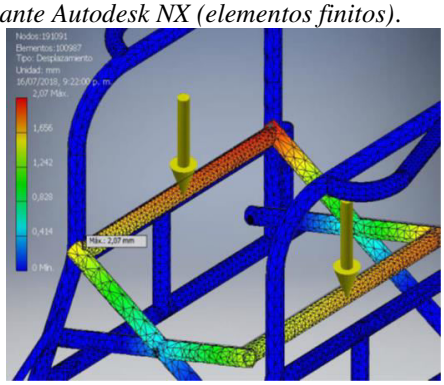
Figura 4: Evaluación de carga en el chasis mediante Autodesk NX (elementos finitos)



Fuente: Los autores

En la figura 4 se ve la simulación realizada al chasis con carga aplicada en la silla del chasis, el color azul indica que la fuerza no afecta la resistencia del material.

Figura 5:*Evaluación de carga sobre el chasis mediante Autodesk NX (elementos finitos).*



Fuente: Los autores

En la figura 5, se realiza la simulación de cargas sobre el chasis, los puntos rojos, son las zonas que soportan más carga.

4.3.Construcción de uniones guadua-polímero.

Para la construcción del chasis del vehículo, es importante la definición de las uniones de los diversos perfiles de guadua, teniendo en cuenta que los materiales metálicos, emplean uniones de soldadura, tornillos o soportes laminados, para la madera, en diferentes estructuras se emplean pegantes, resinas y mezcla de fibras con resinas que con el tiempo se degradan, adicional a esto se hace necesario que las uniones actúen como parte del mismo material.

Por lo anterior, y aprovechando los trabajos realizados con polímeros, se probaron las características de una unión de guadua, con adición de polímero fundido como agente de ligante.

Para la realización de las uniones, se tuvo en cuenta :

-Los perfiles de guadua se cortaron entre nudos, para poder llenar las cámaras de la guadua, con polímero fundido.

-Previo a la unión con polímero , se hizo un desbaste grueso a los bordes de la guadua, como se muestra en la figura 6, esto para mejorar el agarre del polímero con la guadua.

Figura 6. Guaduas desbastadas en las puntas



Fuente: Los autores.

Posteriormente con el material listo y la extrusora con T°entrada:90°C y T°salida: 190 °C, se procede a rellenar las cámaras de la guadua con Polietileno de baja densidad (PEBD), este proceso se hace de forma manual. Luego de llenar la guadua, se alinean los perfiles según el ángulo y se procede a recubrir la unión con una capa de polímero como se muestra en la figura 7.

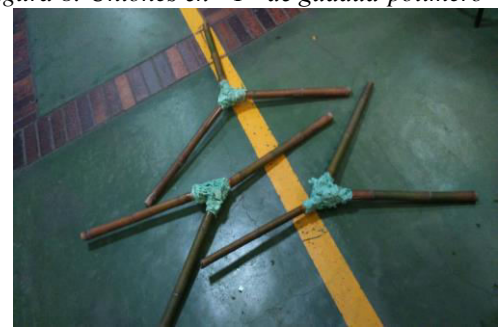
Figura 7. Recubrimiento de la unión.



Fuente: Los autores.

Luego de obtener la unión con el diseño específico, se deja enfriar esta, cuidando que no se vaya a deformar, de esta forma se obtienen uniones rectas, anguladas o en "Y", como se observa en las figura 8 y figura 9.

Figura 8: Uniones en "Y" de guadua-polímero



Fuente: Los autores.

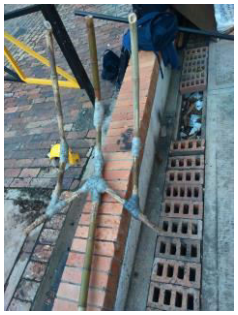
Figura 9: Unión de 90° de guadua-polímero

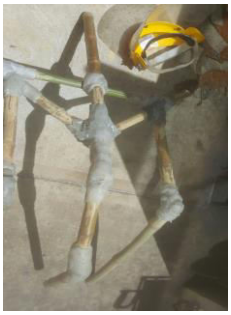


Fuente: Los autores.

4.4.Construcción del chasis.(pruebas)

Figura 10:Chasis-inicio Figura 6:Chasis-constr.





Fuente: Los autores.

Para la construcción del chasis se realizo la metodología explicada en el punto anterior, haciendo cada corte y unión a medida que se avanzaba, en algunos casos se hicieron algunos cambios por la dificultad en las uniones al aplicar el polímero fundido.(Figura 10)

Durante el proceso de unión de los perfiles de guadua, se ensayo una mezcla de polímeros (80%PEBD-20%PET), obteniendo una resistencia superior, en cuanto a agarre de la guadua, como a estabilidad de la unión, este análisis y el de la unión con PEBD, se hace en otro documento desarrollado previo a este.

Figura 11: Acabado del chasis.



Fuente:Los autores.

En la figura 11 se puede ver la terminación del chasis en cuanto a construcción, con uniones de polímero mezclado, y en la figura 12 se aprecia el espaldar de la silla y los apoyos para la rueda de tracción.

Figura 12:Estructura de silla y apoyos.


Fuente:Los autores.

4.5.Instalación del sistema de tracción.
El sistema de tracción del VTH, se definió de acuerdo al diseño realizado, con unas variaciones en la longitud de la cadena y la ubicación de un sistema tensor, para generar un ángulo en el recorrido de la cadena, como se ve en la figura 13, el pedal se instaló por encima del chasis a la altura superior de las llantas,

Figura 13: Instalación del pedal.


Fuente:Los autores.

En la figura 14 se aprecia el chasis terminado, con el montaje del sistema de tracción, que pasa por debajo del chasis, con un tensor y el pedal por encima de la altura de la silla.

Figura 14:Chasis con sistema de tracción



Fuente:Los autores.

En la figura 14 también se pueden ver los ejes de la dirección que se decidieron inicialmente, también se indican las partes del vehículo.

4.6.Instalación del sistema de dirección.
De acuerdo al diseño inicial, se buscó usar elementos que facilitarán el desplazamiento, por esta razón se construyeron inicialmente soportes de tenedor para las dos ruedas delanteras, como se aprecia en la figura 15.

Figura 15:VTH terminado con tenedores


Fuente:Los autores.

Sin embargo en las pruebas fallaron los soportes de tenedor, debido a la altura y poco apoyo, por esta razón se cambió el diseño para apoyar todo el chasis en un eje delantero más bajo, de igual manera la dirección se construyó conectando directamente las articulaciones con barras de guadua que se manipulan lateralmente como se puede ver en la figura 16.

Figura 16: Sistema de eje y dirección


Fuente:Los autores.

4.7.Instalación de la silla.
Con el chasis terminado y los sistemas de tracción y dirección montados, se procedió a fijar la silla que se diseñó con altura de la espalda de 50X 40 cm. y la base de 40X40 cm. , construida en espuma de densidad media (Naranja), y forrada en material sintético, anclada al chasis mediante correas y seguros, como se observa en la figura 17 y 18.
Figura 17: VTH terminado con silla.



Fuente:Los autores.

Figura 18: Vista de la silla



Fuente:Los autores.

4.8.Ruedas.

Finalmente, se eligieron tres ruedas del mismo tamaño (27 pulgadas), de esta forma se asegura el avance y la estabilidad en los giros. Como se puede apreciar en las diferentes figuras que se muestran sobre la construcción, la estabilidad exigió bastante trabajo, durante el desarrollo del vehículo.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Como resultados, se mencionan las características mecánicas del VTH, tanto de construcción, como de rendimiento.

-Peso del VTH: 20 kg.
- Distancia entre ejes: 1,10 m
-Ancho del eje delantero: 0,80 m.
-Avance por cada pedal: 5,3 m.
-Giro mínimo realizado:3,8 m.
-Peso soportado: 80 kg.

El vehículo ha servido como modelo para cambios más avanzados en la construcción de VTH, en otros materiales y para mejorar características técnicas. En la figura 15 se observa el VTH terminado con todos los elementos definidos.

Figura 15: VTH terminado.



Fuente:Los autores.

6.ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a las evidencias presentadas, se puede establecer que el desarrollo del VTH , se realizó de forma integral, involucrando cálculos y medidas en el diseño y la validación.

Durante la selección de materiales se estudiaron alternativas que involucran, evaluación de propiedades físicas y mecánicas de los materiales seleccionados, nuevos usos y aprovechamiento de materiales de desecho, todo como alternativa a los medios de transporte actuales y que generan congestiones, con la correspondiente afectación ambiental.

Por lo anterior la presentación de el VTH construido en guadua y unido con polímero reciclado, da respuesta a diversas necesidades de la población en general. Como punto adicional el diseño presenta unas ventajas de comodidad y desarrollo innovador, respondiendo a la búsqueda de alternativas en el transporte.

Los resultados obtenidos se igualan o mejoran los

de esfuerzos previos (Correa y Ramírez 2017).

Como resumen, se puede afirmar que el desarrollo del Vehículo de Tracción Humana, en materiales de guadua y polímero reciclable, es un trabajo de enseñanza-investigación integral, abarcando campos desde el diseño, materiales, ingeniería, recursos naturales, medio ambiente, movilidad y sociedad.

7. CONCLUSIONES

-El desarrollo de un modelo de VTH hace necesario el trabajo de modelado mecánico, de esta forma se aclaran dudas en cuanto a la construcción y los materiales.
-Un Vth es alternativa de transporte, deporte y salud integral.
-La construcción de vehículos de tracción humana, potencia el cuidado del medio ambiente con el uso de materiales de reciclaje.
-El empleo como ligante o conector que presenta el Polímero en este proyecto es novedoso en el campo de la construcción de mobiliario básico y una alternativa a productos comerciales que contaminan.
-La adaptación de los sistemas de dirección, tracción y silla en un vehículo de tracción humana, acordes a los diseños y materiales existentes, son una herramienta funcional en el desarrollo de nuevos vehículos.
-El desarrollo de alternativas de transporte y recreación se fortalece con trabajos de nuevos vehículos y materiales, haciendo accesible económicamente estos móviles.
-El uso de la guadua en este trabajo se sale de su función de lujo o artesanal, para convertirse en una alternativa estructural.
-La combinación de las propiedades de la guadua con el Polímero, son una alternativa real y suficiente en el campo de las estructuras.

8.REFERENCIAS.

Acurio, B., Stalin, W., Capilla, P., & Steve, I. (2018). Implementación de una máquina trituradora para el reciclado del material de Tereftalato de Polietileno (Bachelor's thesis, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi; Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; Carrera de Ingeniería Electromecánica).

Agurto Salazar, C. A. (2017). Diseño y construcción de una carrocería de un vehículo monoplaza con materiales moldeados reciclables (Bachelor's thesis).

Bustamante, B. P. (2012). La degradación de los plásticos. Rev. Univ. EAFIT, 30(94), 67-86.

-Chan Yah R., Interian C., Pereira E., 2012, Informe de la investigación científica de la Península del Yucatán, Universidad de Guadalajara, Centro de Investigaciones en Ergonomía, Jaguar 2012, Guadalajara, Jalisco, México.

Estupiñan, S. C. M., Galvis, J. S. R., Jaimes, C. J. V., Iguaran, J. A. M., & Cárdenas, J. E. C. (2016). Diseño conceptual, formal y funcional de un vehículo de tracción humana como propuesta de movilidad urbana. Revista Integra: Investigación Aplicada, Desarrollo Tecnológico e Innovación, 4(2), 84-105.

GALAN, J. A. C. (2015). Diseño de un cuatriciclo ligero para su homologacion (Doctoral dissertation)

García Negrete, A., & Peña Doria, A. A. (2018). Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH), enfocado a la movilidad sostenible y adaptable a las condiciones del terreno en el municipio de Montería (Doctoral dissertation).

Garrido Sorribes, À. (2016). Estudio experimental de desarrollo de plásticos ignífugos (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya)

G. Correa-Henao, A. Ramírez-Piñeros, “Prototipo de Bicicleta para Transporte Urbano Individual Sostenible”, Lámpsakos, no. 17, pp 40-51, 2017
DOI: http://dx.doi.org/10.21501/21454086.2055

Carmenate Milián, Lino Manual de medidas antropométricas / Lino Carmenate Milián, Federico Alejandro Moncada Chévez, Engels Waldemar Borjas Leiva -1 ed. – Costa Rica: SALTRA / IRET-UNA, 2014. 80 p.: il.; 25 cm. (Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas Informes Técnicos IRET; n°19)

García Negrete, A., & Peña Doria, A. A. (2018). Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH), enfocado a la movilidad sostenible y adaptable a las condiciones del terreno en el municipio de Montería (Doctoral dissertation).

Gómez, N. M., Gutiérrez, G., & Vera, F. L. (2016). Evaluación del uso de PET reciclado como componente de mezclas poliméricas para producción de perfiles plásticos. Informador Técnico, 80(2), 87. (2016). Evaluación del uso de PET reciclado como componente de mezclas poliméricas para producción de perfiles plásticos. Informador Técnico, 80(2), 87.

Iglesias, M., Lesa, A. I., Pérez, C., Mosca, D., & Raimonda, P. (2018). El plástico reforzado con fibra de vidrio. INNOTEC Gestión, (8 ene-dic), 56-60.

MIRÓN RASO, V. Í. C. T. O. R. (2016). Puesta en marcha de una extrusora de plástico para la fabricación de filamento destinado a impresoras 3D (Doctoral dissertation).

Químico, I. C., Maire, C. I. S., Cordero, H. P., Abarca, R. Q., & Encina, P. j. (2017). Polímeros compuestos basados en nanoestructura de carbono para desarrollar materiales con memoria de forma. Santiago. Chile.

Villafañe Calvo, I. (2018). Análisis mecánico del material polimérico PET proveniente de botellas de plástico.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ANÁLISIS TÉRMICO POR ELEMENTOS FINITOS DE FUSORES PARA IMPRESIÓN 3D POR FABRICACIÓN CON FILAMENTO FUNDIDO.

THERMAL ANALYSIS BY FINITE ELEMENTS OF HOTENDS FOR 3D PRINTING BY FUSED FILAMENT FABRICATION.

MSc. Germán Andrés Gutiérrez Arias*, Esp. Fernando Jiménez Diaz*, Ing. Jorge Valcárcel Guzmán.*

* **Universidad Santo Tomás,** Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de investigación: GIDINT. Calle 19 #11-64, Tunja, Boyacá, Colombia.
(+57)(8)7440404.
E-mail: german.gutierrez@usantoto.edu.co.

Resumen: La impresión 3D por Fabricación de Filamentos Fundidos (FFF) actualmente presenta obstáculos para alcanzar altas velocidades de impresión, principalmente por la incapacidad del fusor de procesar el filamento suficientemente rápido. Este artículo presenta los resultados del análisis de flujo termodinámico realizado sobre diseños comerciales de fusores para identificar los parámetros de diseño que tienen mayor incidencia en el flujo másico de salida de material, y por consiguiente en la velocidad y calidad de impresión. Se realizó un análisis térmico por elementos finitos para caracterizar el efecto de los materiales y elementos geométricos de diseño de los fusores, en éste análisis se obtuvieron los comportamientos de los fusores comerciales y los efectos que ocasionan los cambios de geometría y de materiales, las variables de control fueron el volumen de cámara y el volumen de transición vítrea de cada modelo. Éstos resultados serán empleados como criterios de diseño de un nuevo fusor.

Palabras clave: Impresión 3D, Elementos finitos, análisis térmico, fusor, extrusor.

Abstract: 3D printing Fused Filament Fabrication (FFF) currently presents obstacles to achieve high printing speeds, mainly due to the inability of the hotend to process the filament fast enough. This article presents the results of the thermodynamic flow analysis carried out on commercial designs of hotends in the aim to identify the design parameters with higher incidence in the mass flow of material output, so therefore, in the speed and quality of printing. Finite elements thermal analysis was carried out to characterize the effect of the materials and geometric design elements of the hotends, in this analysis the behavior of the commercial melters and the effects caused by the changes in geometry and materials were obtained, the control variables were the chamber volume and the glass transition volume of each model. These results will be used as design criteria of a new hotend.

Keywords: 3D printing, finite elements, thermal analysis, Hotend, extruder.

1. INTRODUCCIÓN

Entre las técnicas más conocidas de impresión 3D se encuentran la FFF (Fabricación con filamento fundido por sus siglas en inglés), que consiste en calentar un filamento de plástico, PLA, ABS u otro polímero termoplástico y extruirlo a través de una boquilla para formar capa por capa la figura a construir. El prototipado rápido FFF presenta varias ventajas respecto a las otras técnicas como por ejemplo el hecho de que es una técnica de impresión 3D de bajo costo, sencilla en su construcción y funcionamiento, y la generación de prototipos se efectúa muy rápidamente. Las impresoras 3D pueden ser objeto de un diseño más completo, ya que su origen sin fines de lucro hace que carezcan de optimización y precisión en algunos aspectos (Jerez, 2015). Un elemento fundamental de la impresora y determinante en la calidad de impresión es el extrusor, ya que toma el filamento de la bobina, lo funde y lo deposita sobre la superficie de impresión de forma precisa, y acorde a los parámetros de impresión que lee la impresora. Este consta, independientemente del sistema de transporte del material, de cuatro componentes indispensables: la guía de filamento, el bloque caliente, la boquilla y el disipador de calor (Fig 1), que en conjunto se conocen como fusor o hotend en el idioma inglés.

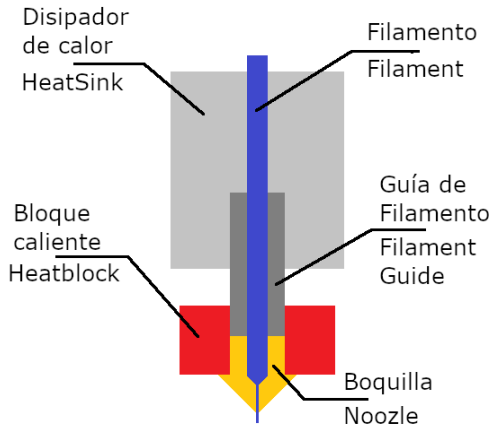


Fig. 1. Partes de un fusor

La boquilla define el diámetro de salida del material fundido y por lo tanto el ancho de cada capa en el proceso de construcción y su temperatura debe ser constante para asegurar un flujo correcto del material. Esa temperatura se logra a través de la conducción de calor desde el bloque caliente, que tiene una resistencia eléctrica sobre la cual se controla la potencia térmica de entrada al fusor. Además, el bloque caliente incorpora un sensor de temperatura que permite el monitoreo y control de la misma. Los demás componentes superiores del fusor están diseñados para reducir las pérdidas de calor a través de ellos (Jerez, 2017). Algunos extrusores incorporan una barrera de calor, en un material de baja conductividad térmica para reducir el flujo del mismo hacia la parte superior. En la mayoría de diseños, en la parte superior del fusor se encuentra un disipador de calor en aluminio e incluso con una ventilación forzada a través de un ventilador que permite el control de la temperatura superior del fusor.

El control de la temperatura del fusor es fundamental para mantener la calidad de impresión. Una fluctuación fuerte, puede generar obstrucciones en el fusor y por lo tanto discontinuidades en el flujo de material que afectan la calidad de las piezas fabricadas (Turner N,2014). También es muy importante disminuir las pérdidas de calor desde el bloque caliente hacia la parte superior del extrusor para disminuir el consumo de potencia de la resistencia de calentamiento y evitar deformaciones en las piezas plásticas de las impresoras, que pueden empezar a presentarse si se someten a temperaturas mayores a 35°C (Domingo E, 2014).

Por lo tanto, el análisis y la comprensión de la respuesta térmica del fusor es fundamental para proponer una mejora y optimización de diseño del mismo, que permita mejorar sus características de funcionamiento: como la velocidad de impresión y el funcionamiento a mayores temperaturas, con lo cual se podrá utilizar esta técnica de manufactura en otras aplicaciones.

Son pocos los estudios que han tratado de analizar el comportamiento térmico del fusor y optimizar su diseño. En la literatura revisada, se encuentran investigaciones (Sukindar, 2016), (Papon, 2017), (Sukindar, 2017), que han desarrollado modelos de análisis por elementos finitos para comprender el efecto de los parámetros geométricos del fusor, en variables mecánicas del proceso de impresión, como la caída de presión del material fundido, el flujo de material y el espesor de capa. Los resultados reportados por estos autores indican una alta relación entre la geometría de la boquilla de impresión y la calidad de las impresiones. Además, indican que un componente fundamental que determina el comportamiento térmico del extrusor es el heatbraker presente en algunos diseños analizados.

Jerez Mesa y su equipo de investigación, en 2015 abordaron el diseño de un extrusor para impresoras 3D Opensource usando análisis por elementos finitos para comprobar su desempeño térmico (Jerez, 2015), en 2016 abordan la influencia del flujo de aire generado por un ventilador acoplado al extrusor, en los mecanismos de transferencia de calor durante el proceso de impresión (Jerez, 2016) también apoyados en análisis por elementos finitos, éste mismo equipo realizó un trabajo similar (Jerez, 2017) al abordado en éste artículo, pues realizaron el análisis de tres extrusores, uno comercial y dos diseños auténticos, pero en éste caso los análisis fueron experimentales mediante el empleo de termocuplas.

Por otra parte, en (Günel, 2017a) se centraron en cómo la geometría del disipador de calor afecta el rendimiento de refrigeración y en (Günel, 2017b) se han enfocado en analizar el efecto de la geometría de la boquilla de ventilación forzada, en la distribución de calor en el fusor, sin embargo, en ambos documentos se limitan a identificar los modelos con mejor desempeño sin aclarar las razones técnicas por las cuales ésto ocurre.

Es valioso destacar que, en los documentos revisados, cuando se menciona la temperatura de transición vítrea (tg), lo hacen para caracterizar algún material termoplástico, pero, lejos de ser una simple característica de los materiales, es un elemento que da origen a un criterio de diseño que se encontró como indispensable, denominado volumen de transición vítrea.

En este artículo se presenta un análisis por elementos finitos, del comportamiento térmico de tres de los fusores comerciales más utilizados en impresión 3D de bajo costo, con el objetivo de identificar los rasgos de diseño de mayor incidencia en la calidad y la velocidad de impresión que permitan más adelante proponer un diseño propio mejorado.

El equipo de Jerez Mesa presenta una estrategia de desarrollo de fusores (liquidificadores) basada en la generación de propuestas de diseño y posteriormente la comparación de desempeño con modelos comerciales, mientras que en éste artículo se plantea una estrategia opuesta, en la que se obtienen los criterios de diseño mediante un análisis de extrusores comerciales y aportes realizados por otros, con el fin de establecer restricciones, parámetros y variables que permitan en una próxima etapa, el desarrollo de un nuevo fusor que realmente supere las deficiencias y limitaciones de los modelos disponibles actualmente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Selección de modelos a analizar

La selección de los modelos comerciales de fusores de impresión 3D para la realización de las simulaciones térmicas se realizó principalmente bajo los siguientes parámetros:

*Compatibilidad con las impresoras 3D más aceptadas y distribuidas en el mundo como las Prusa i3 y todas las demás impresoras de la familia Reprap, Creality, Anet, Lulzbot, Printbot, Wanhao, Tevo entre otras.
*Disponibilidad en el mercado local.
*Opiniones de usuarios en los principales sitios web de la comunidad dedicada a la impresión 3D como all3dp.com, matterhackers.com, 3dprinterchat.com y reprap.org.

Bajo estas condiciones se seleccionaron los siguientes Modelos:

ED3v6: Es prácticamente el modelo estándar de fusores hechos completamente de metal en el mercado, goza de un diseño simple que lo hace fácil de reproducir por lo que existen cientos de clones disponibles, haciéndolo además económico, en las comunidades, foros y rankings aparece en los primeros lugares, es modular, lo que quiere decir que el disipador de calor, la guía de filamento, la boquilla y el bloque caliente son independientes.

Mk8: Su diseño ha permitido una alta aceptación en el último año, ha venido sustituyendo al modelo ED3v6 en muchas impresoras que son producidas masivamente como las Anet y las Prusa, pues consta de sólo tres partes como tal, la guia de filamento, el bloque caliente y la boquilla, el disipador de calor es a la vez el soporte del motor de transporte, haciendo su fabricación muy rápida y económica.

B3 innovations Pico: Tiene un diseño que presenta un solo cuerpo exterior (Heat-Block, Heat Sink y Heater Block) como una única pieza unitaria, hecha en acero inoxidable. El diseño Pico presenta una geometría cilíndrica en todo su cuerpo lo cual mejora considerablemente la distribución de calor a lo largo del cuerpo.

2.2 Modelos digitales

Los fusores fueron recreados digitalmente a través de software CAD, los diseños originales fueron modificados empleando características de los otros modelos para poder tener identificar con claridad la influencia de éstas características en el comportamiento térmico de los fusores.

En general, cualquier modelo de fusor sigue el mismo esquema mostrado en la figura 1, sin embargo tienen rasgos distintivos fuera de las dimensiones y los materiales, el más importante es un estrechamiento del diámetro de la guía de filamento justo antes del bloque caliente, se conoce como *rompedor de calor* o en inglés y como será llamado en el resto del documento, *heatbreaker*, éste estrechamiento disminuye la conducción de calor hacia la parte superior del fusor *heatsink* (Günel, 2017a) , principalmente para fusores completamente metálicos, los beneficios e inconvenientes causados por éste rasgo serán discutidos en los resultados.

Otro elemento de diseño distintivo es la presencia de aletas disipadoras de calor, normalmente hace parte de un cuerpo independiente de la guía de filamento, pero ésta va fija en medio a través de una rosca.

2.3 Simulación

Inicialmente se alimentó el software de simulación por elementos finitos cargando las geometrías de los componentes de cada Modelo, a continuación, se asignaron los materiales correspondientes a las piezas y se hizo el proceso de mallado, que es dividir el objeto en un número finito de elementos, donde el tamaño de cada eslabón depende del grado de precisión deseado de la simulación, posterior a esto se asignaron las siguientes condiciones:

*Convección con el entorno, donde se asignó que el material que rodeaba cada fusor era aire a una temperatura de 25°C.
*La carga térmica se asignó una potencia de 40 Watt a un elemento insertado en el bloque caliente limitando la temperatura máxima a 245°C conforme a la Tabla 1, correspondiente a la temperatura máxima de derretimiento del ABS.
Por último, se realizaron los acoplamientos térmicos entre componentes y se ejecutaron las simulaciones.

Tabla 1: Características de los materiales para impresión 3D

Material	*MFR g/10min*	*UMP (°C)*	*LMP (°C)*	*Tg (°C)*
ABS	4.1	245	225	~97
PLA	6.09	160	145	~60
NYLON	6.2	195	185	~50

Índice de fluidez MFR
Máxima Temperatura UMP

de derretimiento	
Mínima Temperatura de derretimiento	LMP
Temperatura de Transición Vítrea	Tg

A continuación se verificaron los resultados de las simulaciones basadas en las características del material común más exigente, el ABS. Todo el material que se encuentre entre la temperatura mínima de derretimiento y la de transición vítrea se encuentra a una temperatura no deseada por estar en un estado que no es ni líquido ni sólido, a esto se le llamará *volumen de transición vítrea,* principal causante de problemas al momento de imprimir, pues impide al filamento sólido actuar como émbolo para empujar el filamento derretido, causando atascamientos, retrocesos del material e incapacidad de expulsar altos volúmenes de material aumentando la presión ejercida por el mecanismo de propulsión de filamento, por lo tanto, el cálculo del volumen de transición vítrea es uno de los puntos fundamentales de éste análisis.

De izquierda a derecha, en la figura 2 se pueden ver los resultados de las simulaciones de los modelos ED3v6, Pico, MK8 sin heatbreaker y MK8 con heatbreaker.

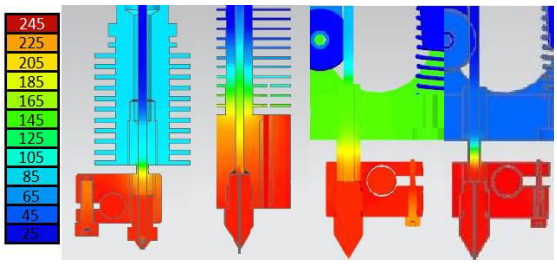


Fig. 2. Resultado de las simulaciones

3. RESULTADOS

Todos los fusores tienen una perforación de 2mm para el paso de filamento a lo largo de toda su extensión hasta la boquilla donde se reduce el diámetro, la región de interés es donde la guía de filamento se incorpora o se convierte en el bloque caliente, por lo que calcular el volumen de transición vítrea fue sencillo una vez teniendo las simulaciones, fue suficiente con marcar los puntos donde el medio filamento se encontraba a 97° y a 225° y a continuación medir la distancia entre estos puntos para así calcular el volumen de ese cuerpo cilíndrico. Con ésto se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Comparación de volúmenes de cámara y de transición vítrea

Modelo	*Volumen de cámara (mm^3)*	*Volumen de Transición Vítrea con heatbreaker (mm^3)*	*Volumen de Transición Vítrea sin heatbreaker (mm^3)*
PICO	99.67	N/A	129.08
ED3v6	52,61	120,01	N/A
MK8	69,8	25,2	119,4

Las simulaciones con el modelo MK8 (Fig. 3) muestran el efecto del heatbreaker, no sólo sobre el filamento a la entrada del bloque caliente sino sobre el cuerpo disipador, donde se evidencia un considerable aumento de temperatura de éste cuando no hay heatbreaker, lo que se traduce en pérdidas significativas de energía y en entorpecimiento del proceso de extrusión por el calentamiento anticipado del filamento.

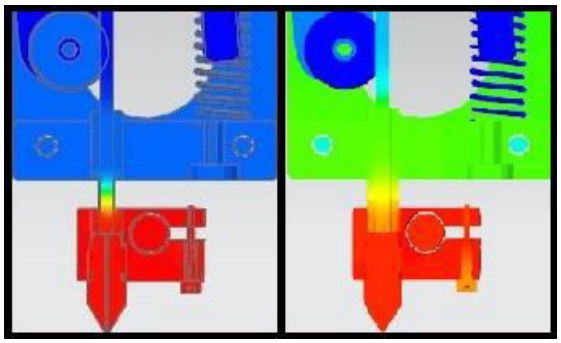


Fig. 3. izquierda: MK8 con heatbreaker, derecha:MK8 sin heatbreaker

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El volumen de transición vítrea es un criterio de diseño de fusores para impresión 3D por fabricación por filamento fundido ya que emplean el filamento como émbolo, generando la necesidad de reducir el volumen de transición vítrea.

El heatbreaker entendido ya como la reducción de material conductor térmico a la entrada del heatblock se traduce en mejor aprovechamiento de la energía al reducir la necesidad de disipar calor.

El uso de heatbreaker en las guías de filamento tiene un efecto interesante cuando se combina con un cuerpo disipador de calor en la parte superior de las mismas, pues mejora la función de éste de la siguiente manera: cuando no hay heatbreaker el disipador tiene que bajar la temperatura del filamento que ha absorbido calor desde el heatblock, en cambio, cuando hay heatbreaker el cuerpo disipador mantiene la temperatura del filamento a la temperatura ambiente, y con una fuente de aire forzado puede incluso estar por debajo de la temperatura ambiente mejorando significativamente el efecto émbolo del filamento sólido sobre el filamento fundido.

Usar guías de filamento con heatbreaker es indispensable para reducir el volumen de transición vítrea.

Emplear un bloque caliente (heatblock) de acero inoxidable reduce el aprovechamiento de la cámara interna y el calor generado por el elemento caliente (heatelement).

LLevar a una propuesta de diseño nueva y original los hechos identificados durante éste estudio implica tomar criterios basados en el entendimiento de la ocurrencia de los mismos, es decir, éste estudio por análisis por elementos finitos sólo permite realizar comparaciones empleando ausencia y presencia de rasgos o características pero ya identificados los efectos falta identificar las causas, ésto se realizaría mediante éste mismo instrumento (análisis por elementos finitos) variando las características de cada rasgo de forma paramétrica para así conseguir información que permita determinar las dimensiones y materiales apropiados para cada rasgo en la nueva propuesta.

REFERENCIAS

NDomingo-Espin, M., Borros, S., Agullo, N., Garcia-Granada, A. A., & Reyes, G. (2014). Influence of building parameters on the dynamic mechanical properties of polycarbonate fused deposition modeling parts. 3D Printing and Additive Manufacturing, 1(2), 70-77.

Günel, Onur & Koc, Emre & Tiryaki, Gürcan. (2017). Investigation of heat sink geometry effect on cooling performance for a fdm 3d printer liquefier.

Günel, Onur & Koc, Emre & Yavuz, Tahir. (2017). Investigation of thermal effect on 3d printer liquefier of different cooling fan nozzle geometry.

Jerez-Mesa, R., Gomez-Gras, G., Travieso-Rodriguez, J. A., & Garcia-Plana, V. (2017). A comparative study of the thermal behavior of three different 3D printer liquefiers. Mechatronics.

Jerez-Mesa, Ramon & Travieso-Rodriguez, J.A. & Corbella, X & Busqué, Raquel & Gómez-Gras, Giovanni. (2016). Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. Mechatronics. 36. 10.1016/j.mechatronics.2016.04.007.

Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., Gomez-Gras, G., & Freixedes, J. (2015) Design of open source 3d printer extruder and modelling of thermal performance with FEA.

N. Turner, B., Strong, R., & A. Gold, S. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal, 20(3), 192-204.

Papon, M. E. A., Haque, A., Ali, A., & Sharif, R. (2017). Effect of nozzle geometry on melt flow simulation and structural property of thermoplastic nanocomposites in fused deposition modeling. In proceedings of the american society for composites—thirty-second technical conference.

Sukindar, N. A., Baharuddin, B. T., Jaafar, C. N. A., Ismail, M. I. S., & Mohd Ariffin, M. K. A. (2016). Analyzing the effect of nozzle diameter in fused deposition modeling for extruding polylactic acid using open source 3D printing.

Sukindar, N. A., Ariffin, M., Anuar, M. K., bin Baharudin, B. T., Jaafar, C. N. A., & Ismail, M. I. S. (2017). Comparison on Dimensional Accuracy Using a Newly Developed Nozzle for Open-Source 3D Printer. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 859, pp. 15-19). Trans Tech Publications.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE ARCILLA PARA IMPRESIÓN 3D DE BAJO COSTO.

DESIGN OF A CLAY EXTRUSION SYSTEM FOR LOW COST 3D PRINTING.

MSc. Edwin Rúa Ramírez*, MSc. Germán Gutiérrez Arias*, Esp. Nelson Villamizar Cruz*, Esp. Fernando Jiménez Diaz* Est. Nicolás Pamplona

*** Institución 1, Facultad Ingeniería mecánica, Grupo: GIDINT.**
USTA - Tunja, Boyacá, Colombia
(8) 7440404 edwin.rua@usantoto.edu.co

Resumen: El prototipado rápido por manufactura de deposición fundida (FDM) en impresora 3D, ha evolucionado rápidamente en cuanto a materiales impresos como polímeros, metales y compuestos. A través de este proyecto hemos diseñado un sistema de extrusión de arcilla (cerámica) que nos permite imprimir rápidamente objetos en tres dimensiones ya sea como prototipo, productos artísticos, entre otros. Se realizó una búsqueda bibliográfica acerca de tipos de extrusoras de arcilla y sus componentes principales, se diseñó el sistema de extrusión de arcilla de acuerdo a las variables de impresión (plasticidad de la arcilla, velocidad de salida, flujo másico etc) de acuerdo al diseño se procedió a realizar cálculos y selección de materiales para el equipo extrusor. Para el proceso de arrastre de la arcilla hasta la boquilla de salida se seleccionó un husillo o tornillo sinfín en acero inoxidable, con una longitud de 1010 mm de largo, un diámetro de 1 ½ in (38,1 mm), Ángulo del álabe de 13°. La salida de la extrusora de arcilla se acopla a través de una manguera al extrusor de la impresora 3D, donde se regula la velocidad de salida del material de acuerdo al tipo de producto, secado, temperatura ambiente, humedad relativa entre otros.

Palabras clave: *Impresión 3D, Extrusión de arcilla, Prototipado rápido, Diseño, Sistema de extrusión.*

Abstract: The rapid prototyping by manufacturing of molten deposition (FDM) in 3D printer, has evolved rapidly in terms of printed materials such as polymers, metals and composites. Through this project we have designed a clay extrusion system (ceramic) that allows us to quickly print objects in three dimensions either as a prototype, artistic products, among others. A bibliographic search was made about types of clay extruders and their main components, the clay extrusion system was designed according to the printing variables (clay plasticity , exit velocity, mass flow etc) according to the design We proceeded to perform calculations and selection of materials for the extruder equipment.For the process of dragging the clay to the outlet nozzle, a spindle or auger was selected in stainless steel, with a length of 1010 mm in length, a diameter of 1 ½ in (38.1 mm), angle of the vane of 13 °. The output of the clay extruder is coupled through a hose to the extruder of the 3D printer, where the output speed of the material is regulated according to the type of product, drying, room temperature, relative humidity among others.

Keywords : *3D printing, Clay extrusion, Rapid prototyping , Design, Extrusion system.*

1. INTRODUCCIÓN.

En el aprendizaje y la aplicación de impresión 3d se estudia el desarrollo de cuerpos y formas difíciles de realizar convencionalmente. En ingeniería mecánica es de vital importancia el desarrollo de partes de máquinas para el diseño de sistemas mecánicos seguros y eficientes. Por eso, la impresión 3D tiene una gran cantidad de aplicaciones a la ingeniería moderna, por lo cual ha permitido a los estudiantes desarrollar este sistema, mediante diferentes métodos con diferentes materiales y geometrías dando así un claro ejemplo a escala real que lo que se podría producir si sometemos como lo son la arcilla, el PLA, el concreto, etc.

La impresión 3D se puede utilizar para una amplia gama de tareas, como el diseño y prueba de prototipos y productos terminados, en un tiempo más corto. En ingeniería mecánica, los diseños de prototipos se generan continuamente en actividades de clase académica y proyectos de cursos finales por parte de estudiantes y docentes. Sin embargo, los estudiantes muestran limitaciones en la comprensión de los conceptos abstractos representados por dichos diseños. (Rúa R., 2018)

La impresión en 3D es un proceso de producción capa por capa; fue adoptada en la industria manufacturera durante décadas y recientemente se ha introducido en la industria de la construcción para imprimir casas y villas. Esta tecnología puede aportar beneficios significativos a la industria de la construcción en términos de mayor personalización, menor tiempo de construcción, menor mano de obra y costos de construcción (Wu, Wang, & Wang, 2016)

Entre las propiedades más importantes que debe tener la mezcla de la arcilla son la plasticidad y bombeabilidad para que el material se desplace con facilidad al ser expulsado por la boquilla, la viabilidad del material al depositarse sobre la anterior capa impresa y finalmente tener un tiempo abierto en el que las propiedades mencionadas anteriormente permanezcan dentro de las tolerancias marcadas (Torres, 2016).

La arcilla es un mineral que está compuesto por silicatos de aluminio, elementos hidratados a los que debe su consistencia pastosa. Puede producirse por diferentes rocas descompuestas, entre las que se encuentra el granito. Las coloraciones que presenta pueden variar; se pueden notar tonos naranjas si contiene muchas impurezas, pero puede ser blanca si es totalmente pura. Las partículas que la forman son muy pequeñas, de al menos 0,002mm de espesor. La característica principal es que puede adquirir elasticidad si es mezclada con bajo porcentaje de agua, además de que se puede convertir en una pieza con bastante consistente si se seca o es calentada a temperaturas superiores a los 800 ºC.

La arcilla es un material con una gran variedad de aplicaciones, que principalmente se pueden encontrar en la construcción, ha sido utilizada para construir en todos los continentes y en todas las edades de la humanidad, desde que los hombres primitivos decidieron juntarse en asentamientos permanentes. ¡Lo que quiere decir que tiene unos 10.000 años de historia! En la edad moderna, se ha estimado que entre un tercio y la mitad de la población del mundo vive en casas hechas de tierra. En el Yemen (África), hoy en día sigue habiendo edificios de más de 12 pisos de altura, hechos de arcilla no-cocida. En Taos, New Mexico (EEUU) hay edificaciones de más de 900 años que aún se están utilizando.

Existe una gran variedad de impresoras 3D, se clasifican de acuerdo la capacidad de impresión, tipo de material y productos a imprimir. Existen muchas marcas, modelos y tamaños, sin embargo, para la impresión de material cerámico o arcilla aún se encuentra poca información.

La arcilla es el producto del desgaste químico de "feldespato," uno de los minerales más comunes en la corteza de la tierra. La arcilla tiende a ser maleable cuando está mojada, dura y quebradiza cuando está seca. Hay muchas clases de arcilla, cada una con características ligeramente variadas. Algunas combinan con óxidos minerales y pueden adquirir un arco iris de colores. Para la construcción su característica más interesante es la adherencia. Es el pegamento de la mezcla. (NItzkin, 2013)

En la construcción la arcilla ha sido muy bien utilizada como material principal adhesivo o estructural por más de 10.000 años, en conjunto a otros materiales de fácil acceso, era comprimido para formar finalmente ladrillos muy resisten con los que se elaboraban todo tipo de edificaciones, en la actualidad el uso de la arcilla en la construcción se enfatiza en la elaboración de estructuras artísticas para acabados.

Medicinalmente también se encuentra una gran variedad de uso de la arcilla ya que esta mezclada con otros componentes naturales como lo es la arcilla roja, blanca, negra, rosa y verde contienen componentes que ayudan a aliviar o combatir algunos problemas medicinales.

Artísticamente la arcilla por su adherencia y viscosidad permite formar todo tipo de figuras artísticas como jarrones, vasijas, esculturas y piezas o accesorios de alto relieve para uso arquitectónico.

Uno de los objetivos del proyecto es garantizar un amplio espacio de trabajo que le permita al operario limitantes más amplios de lo que permiten otras impresoras, otro factor que se busco era un cambio de boquilla que permitiera una impresión con diferente forma y relieve, también se redujo el número de extrusores buscando optimizar el diseño ya que el primer diseño que se obtuvo contaba con tres fases de extrusor.

2. MATERIALES Y METODOS

Siguiendo la metodología empleada por Robert Norton, Joseph Shigley, Juan Jose Ochoa y Earl R Babbie, se formó una metodología de diseño ideal para el desarrollo de los inyectores para impresora 3D con material de impresión de arcilla medicinal, artística u estructural; la metodología empleada fue:

.

2.1 Diseño del sistema extrusor

Siguiendo los parámetros diseño preestablecido por los autores, se dividió el sistema general en 3 subsistemas básicos, los cuales son subsistema mecánico, subsistema electrónico y subsistema informático.

2.2 Subsistema mecánico: contiene todas las partes y accesorios mecánicos; consta de tornillería, soldaduras, mecanizados, acabados, selección de motor, selección transmisión, sistemas de mantenimiento o lavado, cálculos de desgaste, cálculos dinámicos y de flujo.

2.3 Subsistema electrónico: contiene todos los elementos electrónicos como lo son controladores, servomotores, tarjetas madre, fuentes, cableado, cálculos de consumo eléctrico.

2.4 Subsistema informático: contiene los archivos CAD, códigos de programación, simulaciones de impresión y simulaciones de flujo del material.
Para la elaboración del diseño de los inyectores se realizó una lluvia de ideas entro los integrantes del proyecto, los cuales arrojaron dos posibles sistemas de inyección, uno por sistema de extrusión y el otro por sistema de doble embolo o pistón, al evaluar los pro y en contra de cada sistema, se escogió buscando el sistema más eficiente en flujo de material, facilidad de lavado y construcción sencilla el sistema de inyección por extrusión, el cual cuenta con dos extrusores.

2.5 Prototipo y pruebas

Para el desarrollo del prototipo CAD se utilizó el software de diseño libre AUTODESK INVENTOR el cual cuenta con 98 piezas para el extrusor de inyección y 21 piezas para la boquilla extrusora la cual se acopla a la impresora.

El desarrollo de simulación de impresión y código de impresión se ejecutaron en el software SLIC3R.
El análisis de flujo se desarrolló en el software SIEMENS NX.

Finalmente se obtuvieron planos de ensamble, planos de taller y planos de vistas acotados para la elaboración y compra de los materiales.

3 RESULTADOS

3.1 Sistema de extrusión

El sistema de extrusión para la inyección del material se escogió debido a que este presenta muy buena eficiencia, aparate que este permite un flujo constante y buena presión de salida, se diseñó a

partir de la coraza, se escogió un tubo PVC de 6 in (152,4 mm) por 31,49 in (800 mm) de largo, a este se le realiza un corte superior uno de los extremos para poder sacar 4 pestañas de 100 mm por 10 mm para poder remachar con remache M4 cabeza redonda una tolva cuadrada de 220 mm de alto, a 70 mm del centro de la tolva se le hizo un agujero de 20 mm para insertar en él una electroválvula de 12V de ¾ In (19,05 mm) para realizar un lavado general por mantenimiento, en el extremo trasero solo coloco una tapa de PVC de 6 in la cual tiene un agujero de 1 ½ in (38,1 mm) en el que va estar el eje del usillo o tornillo sin fin, en el extremo frontal se encuentra la boquilla del extrusor la cual fue impresa en PLA, esta se sujetó a la camisa del extrusor por medio de 4 remache M4 cabeza redonda.

El usillo está diseñado en acero inoxidable, este tiene 1010 mm de largo, tiene un diámetro de 1 ½ in (38,1 mm), Angulo del alabe de 13°, un paso de alabe de 73 mm, profundidad del canal de 52 mm, holgura o tolerancia entre camisa y el alabe de 1 mm, en el extremo frontal este termina en conicidad en espiral de 75°, esto para que genere mayor presión de salida, en el extremo trasero tiene un tramo de 40 mm de largo por 25 de diámetro, en la parte superior de esta se encuentra un agujero para una cuña (ISO 2491 AA 5x3x20) esto para contener y generar la motricidad del usillo por medio de una Catarina para una transmisión de cadena con un motor que gira a rpm con una potencia de hp.

Para la estructura del extrusor se utilizó perfil rectangular de acero 20-40 de 1200 mm de longitud por 320 mm de alto a cada perfil se le soldó 2 láminas de acero calibre 10 con soldadura MIG o GMAW, la lámina 1 tiene 732 mm de largo por 360 mm de ancho y la 2 tiene 428 mm de largo por 360 mm de ancho. Para la movilidad de esta estructura se le instalaron en la parte inferior 6 ruedas dobles con freno de 100 kg sujetas con tornillos tipo Bristol M4 cincado (DIN 439-2), sujetados con tuercas M4 (DIN 439-2), y para la sujeción de esta se le soldó a la estructura un tubo doblado de 1 in (25,4 mm), para la sujeción del extrusor se diseñaron 6 placas de acero calibre 10 las cuales se soldaron a la lámina 1 con un espacio de placa a placa de 47 mm y de par de placas de 308 mm, el primer par de placas tienen un sistema de bisagras que permiten retirar el extrusor de la estructura y asegurarlo a ella, este se asegura por medio de 4 tornillos tipo Bristol M6 cincado (DIN 439-2), sujetados con tuercas M6 (DIN 439-2).

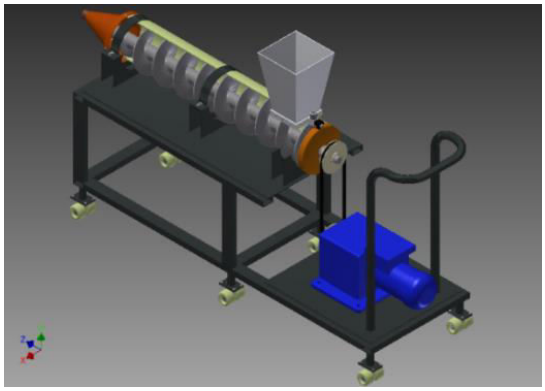


Fig. 1. Imagen isométrica del extrusor con estructura y motor. Fuente: Autores

Para la boquilla extrusora se diseñó a partir de una tapa de PVC de 4 in (101,6 mm), a este de le imprimió en PLA la camisa o coraza de la boquilla, se ajustó por medio de remaches M4 cabeza redonda, en la tapa se abrieron 2 agujeros, 1 para el eje del usillo al que se acopla mediante un acople transmisor del eje al servomotor (Nema 13) que va sujeto a una estructura metálica calibre 10 por medio de 4 tornillos tipo Bristol M2 cincado (DIN 439-2), sujetados con tuercas M2 (DIN 439-2). El otro agujero se utiliza para una terminal en PVC que se ajusta internamente para poderlo conectar de la impresora a la boquilla por medio de una manguera de 35 mm que se conecta a un acople de 35 mm a 15 mm.

El usillo o tornillo sin fin se diseñó en acero inoxidable de tipo espiral cónica para que al recibir el material proveniente del extrusor, salga hacia la placa de impresión con buena presión de salida y constante flujo de material, este tiene unas dimensiones de 165 mm de largo, tiene un diámetro de 3,54 in (90 mm), Angulo del alabe de 5°, un paso de alabe de 28 mm, profundidad del canal de 32 mm, holgura o tolerancia entre la boquilla y el alabe de 1 mm, en el extremo frontal este termina en conicidad en espiral de 68°, esto para que genere mayor presión de salida, para controlar el caudal de salida se le agrego un diafragma en caucho, en la punta de esta se encuentra una rosca para poder ajustar varias boquillas con geometrías diferentes para que la

geometría de impresión cambie a voluntad del usuario, en el extremo trasero tiene un tramo de 12 mm de largo por 25 de diámetro del cual se mecaniza un cuadrado de 10 mm que se acopla mediante un acople transmisor al servomotor (Nema 13).

La estructura está hecha en acero calibre 10 de la cual consta de 3 soportes, el primero para contener la partes inferior de la boquilla, la segunda para soportar la parte superior de esta y el tercero está diseñado para soportar el servomotor, las dimensiones de esta es 182 mm de largo por 113 mm de ancho. Esta se ajusta al carro del eje Z por medio de 4 tornillos tipo Bristol M6 cincado (DIN 439-2), sujetados con tuercas M6 (DIN 439-2), se diseñó con el fin que las boquillas sean intercambiables para que no solo se imprima yeso sino también algún otro material. (Figura 2).

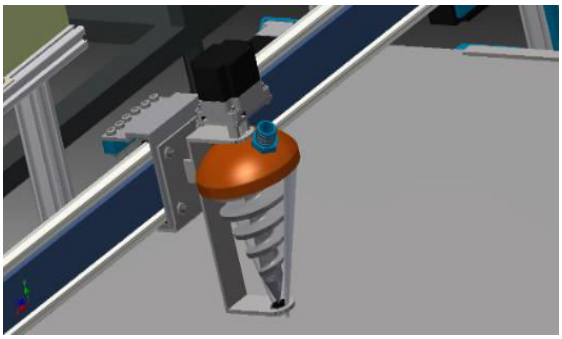


Fig. 2. Imagen isométrica de la boquilla extrusora con estructura y servomotor. Fuente: Autores

4. DISCUSION

Existe una gran diversidad de impresoras 3D, se tipifican de acuerdo al volumen, material y productos a imprimir. Existen muchas marcas, modelos y tamaños, sin embargo para la impresión de material cerámico o arcilla aún se encuentra poca información. El diseño propuesto en este proyecto es la fase inicial para pasar a la simulación, construcción y puesta en funcionamiento.

5. CONCLUSIONES

Con base en la caracterización de la arcilla, se diseñó una extrusora que genera la mezcla de la arcilla y el agua a una presión constante y la envía a la boquilla extrusora de la impresora 3D.

REFERENCIAS

NItzkin, R. (2013). Arcilla. Cómo encontrarla y para qué se puede usar. 1º parte. *EcoHabitar*.

Rúa R., E. B. (2018). Impresión 3D como Herramienta Didáctica para la Enseñanza de Algunos Conceptos de Ingeniería y Diseño. *Ingeniería,*, 70-83.

SITIOS WEB

ANÁLISIS DE UN FLUJO TURBULENTO, CAPAZ DE PRODUCIR VIBRACIONES DENTRO DE UNA TUBERIA HORIZONTAL.

ANALYSIS OF A TURBULENT FLOW, CAPABLE OF PRODUCING VIBRATIONS WITHIN A HORIZONTAL PIPE.

Msc. Maite M. Velasco Ch.*, PhD. Francisco M. León O.**

***Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Km. 1, vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia,+ 57 3166206017. Grupo de Investigación GRUTEC, ULA, Mérida, Edo. Mérida, Venezuela.
maite.velasco@unipamplona.edu.co
****Universidad de Los Andes**, Escuela de Ing. Mecánica, Grupo de Investigación GRUTEC, ULA, Mérida, Edo. Mérida, Venezuela,+58 416 6743456
fleon@ula.ve

Resumen: Recientemente, el estudio de las vibraciones inducidas por flujo de fluidos ha tomado más importancia, porque los diseñadores están utilizando los materiales hasta sus límites, lo que conlleva a que las estructuras sean progresivamente más ligeras y flexibles. Es de importancia práctica mantener la estabilidad del flujo transportado en tuberías, debido a que si la velocidad del fluido se hace bastante grande, el tubo puede hacerse inestable. Se ha encontrado que para altas velocidades de flujo, incluso una pequeña perturbación, puede provocar en el sistema, una vibración que aumenta con el tiempo, y que el movimiento del medio, (vapor o agua), es considerado como la fuente más probable de inducir la vibración en la tubería. Aquí se estudia este comportamiento a través de un experimento demostrativo que analiza la onda oscilatoria producida por el fluido usando una manguera como guía colocada longitudinalmente en el centro de la tubería, la misma es fotografiada y se miden la amplitud, la frecuencia y la velocidad del fluido para relacionar parámetros característicos de las vibraciones y de los fluidos.

Palabras clave: Vibraciones inducidas por fluido, tubería, frecuencia, flujo interno.

Abstract: Recently, the study of vibrations induced by fluid flow has taken on more importance, because designers are using materials to their limits, which leads to the structures being progressively lighter and more flexible. It is of practical importance to maintain the stability of the flow transported in pipes, because if the speed of the fluid becomes quite large, the pipe may become unstable. It has been found that for high flow rates, even a small disturbance in the system can cause a vibration that increases with time, and that the movement of the medium, (steam or water), is considered as the most probable source of inducing that vibration. This behavior is studied through a demonstrative experiment that analyzes the oscillatory wave produced by the fluid. A hose, placed as a guide longitudinally in the center of the pipe, is photographed and measured to find its amplitude, frequency, and speed in order to relate characteristic parameters of vibrations and fluids.

Keywords: Vibrations induced by fluid, pipe, frequency, internal flow.

1. INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de tuberías que transportan fluidos prevalecen en muchos campos, entre ellos la ingeniería civil y marítima, las industrias de energía nuclear y eléctrica, las industrias de procesos químicos y petrolíferos, las aplicaciones navales y aeronáuticas, e incluso la infraestructura diaria. Debido a las excitaciones que surgen tanto del interior como del exterior de la tubería, ya sea causada por bombas, válvulas o vibraciones transmitidas, las respuestas de la interacción fluido-estructura (FSI) de los sistemas de tuberías se inducen y se transmiten casi continuamente a través del fluido y su sistema de confinamiento. Algunas veces estas respuestas son triviales, mientras que otras veces pueden ser lo suficientemente grandes como para hacer que falle la tubería de transporte y el equipo conectado. (Shuaijun L., Bryan W.K., Gongmin L. (2015)).

El mecanismo más probable y más ampliamente observado de las vibraciones estacionarias de las tuberías es la vibración inducida por el flujo, y existen dos razones para ello: la primera es que hay muchas fuentes de vibración dentro del medio en comparación con la excitación mecánica externa transferida a la tubería acoplada desde estructuras o equipos, y la segunda es que la amortiguación de la estructura para la tubería suele ser mayor que la amortiguación del medio; por lo que la vibración de la tubería, podría extenderse mas lejos de la fuente de oscilación del medio (Peter V., Leonid F. (2003)).

En otras palabras, la estabilidad del flujo transportado por tuberías es de importancia práctica, porque, la frecuencia natural del tubo generalmente disminuye con el aumento de la velocidad del fluido (como por ejemplo en la alimentación de líneas de motores de cohetes y turbinas de agua, la disminución de la frecuencia natural puede ser importante). El tubo puede hacerse susceptible a la resonancia o fallar por fatiga, si su frecuencia natural se sitúa por debajo de ciertos límites. Si la velocidad del fluido se hace bastante grande, el tubo puede hacerse inestable. Cada perturbación aplicada al tubo, causa una vibración que disminuye con el tiempo. Se ha encontrado, que para velocidades de flujo, por encima de unos valores determinados, incluso una pequeña perturbación, puede provocar vibración en el sistema, y que la resonancia del medio, (vapor o agua), es considerada como la fuente más probable de vibración inducida por el fluido.

Las estructuras en contacto con un fluido que fluye, ya sean naturales (por ejemplo corrientes de aire o de mar), o hechas por el hombre, están inevitablemente sujetas a fuerzas y vibraciones inducidas por el fluido. Estas vibraciones pueden ser de amplitud grande o pequeña, y pueden ser intrascendentes, o incluso de preocupación leve. Cada perturbación aplicada al tubo causa una vibración que disminuye con el tiempo. (R. W. Gregory and M. P. Païdoussis. (1966) a, c)

La realización de este trabajo, permitió estudiar el comportamiento a través de un experimento demostrativo, donde se analizó la onda oscilatoria producida por el fluido usando una manguera como guía colocada en el centro de la tubería en estudio, la misma será fotografiada para finalmente poder medir, la amplitud, la frecuencia, la elongación y la velocidad del fluido para así poder graficar parámetros característicos de las vibraciones y de los fluidos.

2. ANTECEDENTES.

A diferencia de las vibraciones de estructuras cilíndricas inducidas por flujo transversal ("flujo cruzado"), el estudio de la vibración debida al flujo axial es un fenómeno relativamente nuevo, que comenzó su estudio en serio en la década de 1950.

La mayoría de estos primeros estudios tuvieron como objetivos principales (i) la medición de la amplitud de la vibración de configuraciones particulares de estructuras cilíndricas, modelado y condiciones de flujo en un reactor nuclear; (ii) entender las causas de la vibración; (iii) desarrollo de medios para predecir las amplitudes de vibración; el cual resultó ser, desde el punto de vista de los diseñadores, el objetivo más importante.

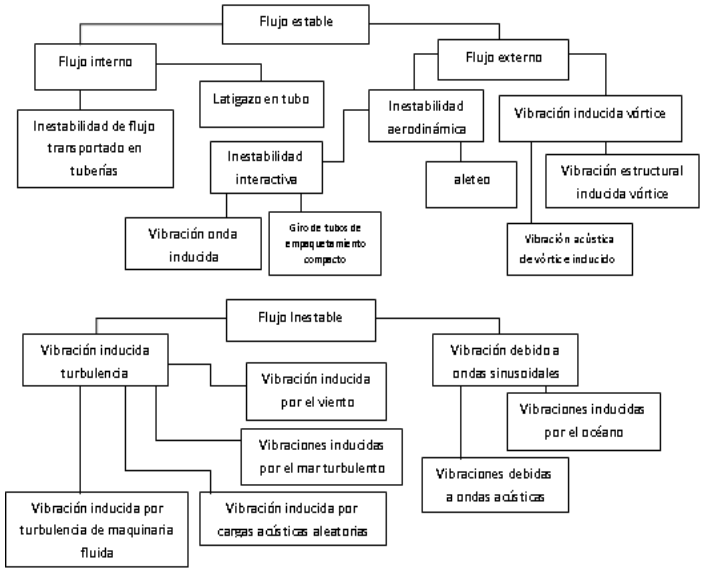
De acuerdo con M.P.Païdoussis and N.T. Issid (1974), entre los principales investigadores que han colaborado en esta área pueden citarse : J.Aitken (1876), Marcel Brillouin (1885), F.J.Bourriéres (1939), Ashley y Haviland (1950), Feodos´ev (1951), Housner (1952), Niordson (1953), Long (1955), Handelman (1955), Heinrich (1956), Bolotin (1956), Hu and Tsoon (1957), Gregory and Païdoussis (1966ª, 1966b), Morchan (1967) y otros.

Entre sus principales aportes se mencionan: estabilidad de tubos en voladizo transportando fluido despreciando las fuerzas de gravedad, ecuación del movimiento para fluido transportado por tuberías, dinámica de estudios flexibles transportando fluidos, tubos en voladizo transportando fluidos y otros.

3. MARCO TEÓRICO.

La interacción fluido-estructura (FSI) existe en tuberías que transportan líquido cuando las ondas de presión en el líquido causan esfuerzos y tensiones en los tubos (y viceversa). La causa inicial de las interacciones puede ser una alteración en el flujo (por ejemplo, la actividad de una válvula o una bomba), o una perturbación en la tubería (por ejemplo, la máquina vibrando). En ambos casos la dinámica resultante implicará una colección extensa de ondas de presión en el fluido y ondas de tensión en la pared de la tubería. Cada vez que estas ondas se reflejen en un apoyo o en una curva en la tubería, inducen nuevas ondas de ambos tipos. Estas son interacciones intrínsecamente de doble dirección. Hay diferentes interacciones entre los fluidos y la tubería. El mapa conceptual 1 ilustra la amplitud de posibilidades, y una clasificación mostrada por Eduard N., Donald R. (2005).

La mecánica de FSI es una nueva rama interdisciplinaria que se ocupa de la hidromecánica y la mecánica sólida. Los sistemas de tuberías que transportan fluido son los sistemas típicos de FSI. Hay principalmente tres acoplamientos entre el fluido y la tubería: Poisson, fricción y acoplamiento de unión. El acoplamiento de Poisson relaciona la presión fluídica con las tensiones axiales estructurales debidas a la presión radial, contracción o expansión de la pared de la tubería, que está asociada con el modo de "respiración" de la tubería. El acoplamiento de fricción es inducido por las fuerzas de fricción generadas entre el fluido y la tubería que produce pérdidas de presión dentro del fluido y por lo tanto los cambios asociados en las tensiones de la pared. Estos dos acoplamientos actúan a lo largo de todo el tubo, el acoplamiento de unión solo actúa en las secciones de unión, como uniones ramificadas, secciones con dobleces, cambios de diámetro y condiciones de frontera.



Mapa conceptual 1. Clasificación de las vibraciones inducidas por fluido

En conjunto, estos acoplamientos pueden influir en las frecuencias naturales de la tubería llena de líquido. Existen dos tipos de FSI: uno aparece en la interfaz entre el fluido y su estructura conectada; el otro aparece en un fluido de dos fases (fluido/sólido), es decir, cuando el fluido y el sólido están parcial o completamente interconectados. (Shuaijun L., Bryan W.K., Gongmin L. (2015).)

3.1 Vibración.

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio, todos los cuerpos que posean masa y elasticidad son capaces de vibrar. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven

juntas en la misma dirección en cualquier momento.

La mayoría de las máquinas y estructuras experimentan vibraciones hasta cierto grado por lo que su diseño requiere la consideración de este efecto dinámico debido a que ocasiona un aumento en los esfuerzos y tensiones. Las vibraciones usualmente están divididas en dos tipos característicos: vibraciones de estado estable y vibraciones transitorias dinámicas; el mecanismo más probable y extensamente observado de vibraciones en estado estable en tuberías es la vibración inducida por fluido.

Hay dos razones principales para esto: primero, debido a la presencia de muchas fuentes de vibraciones dentro del medio en comparación con la excitación mecánica externa transferida a la tubería conectada a las estructuras o equipos, y segundo, la estructura de amortiguamiento para la tubería usualmente es más alta que el medio de amortiguamiento, por lo que la vibración de la tubería puede extenderse lejos de la fuente únicamente debido al medio de oscilación.

Entre las fuentes de medio de vibración (acústica) más comunes están las pulsaciones inducidas por la bomba, el flujo turbulento, la cavitación, remolinos, entre otros. Teniendo en cuenta que el amortiguamiento del fluido es muy pequeño, una gran amplificación usualmente, es observada en las frecuencias de resonancia. Las pulsaciones de la presión del medio afecta la tubería causando un desbalance de las fuerzas en sitios donde la dirección del flujo o la velocidad se cambia (codos, te, orificios, otros). (Robert D. Blevins. (1986))

3.2 Modos de Vibración.

Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico. La mayoría de los sistemas tienen varios modos de vibración (Fig. 1). La vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado. Por ejemplo, si se toca una campana suavemente, lo primero que se va oír es el modo fundamental de vibración, pero si se la toca más fuerte, otros modos son excitados y se oyen los parciales superiores del tono, es decir, en cada vibración se adopta una forma específica y se emite un sonido característico dado por la frecuencia con que vibra. (A.P. French. (1974).)

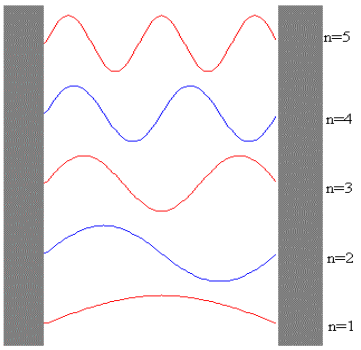


Fig. 1 Modos de vibración. Fuente Glen White. (2010).

La frecuencia mínima de vibración capaz de generar una onda estacionaria se llama Frecuencia Fundamental (f_0 o n = 1). Cuando la cuerda vibra con dicha frecuencia se dice que se ha establecido su modo fundamental de vibración. La frecuencia de los demás modos de vibración son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y se denominan armónicos (n = 2, 3, 4,5,..). Una visión general de todas las condiciones limites y los correspondientes patrones de ondas estables unidimensionales se ilustran en la Fig. 2. Claramente la distancia L entre los dos extremos puede contener cualquier número entero múltiple de la mitad de una longitud de onda de resonancia.

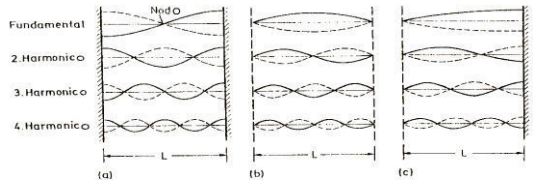


Fig. 2 Patrones de onda estacionaria unidimensional mostrando variaciones de presión para diferentes condiciones finales. Fuente Glen White. (2010).

4. EXPERIMENTO

El experimento demostrativo tiene como propósito, estudiar el comportamiento general y condiciones

de estabilidad asociados con oscilaciones inestables de tubos doblemente empotrados transportando fluido, y de ser posible, reproducir experimentalmente el pandeo y las inestabilidades oscilatorias, para finalmente comparar los valores obtenidos experimentalmente con los valores teóricos.

4.1 Descripción del equipo.

El equipo consiste de dos tanques de acero cada uno con una capacidad de 0,2895m³ (289,5L), uno alimentador y el otro receptor, ambos con tapas de laminas ajustadas por tornillos, una bomba de 2 hp, un fluxómetro (lecturas de apreciación de 10L, 100L, y 1000L), un tubo de vidrio de 0,254m (1 in) de diámetro y espesor de $3e^{-3}$ m (3mm), de longitud de 0.75 m conectado entre ambos tanques, tubería de plástico de diámetro 0,508m (2 in), dos válvulas de control de caudal y una manguera de plástico de diámetro de $95{,}25e^{-3}$ m (3/8 in), la cual fue usada como guía para ver y medir las ondulaciones producidas en el agua. Para atenuar la intensidad del chorro de agua cuando entra al tanque 1 (alimentador) se colocó una malla de plástico, para evitar a que el mismo impacte directamente sobre la manguera que sirve de guía para ver las ondulaciones que se forman en el agua.

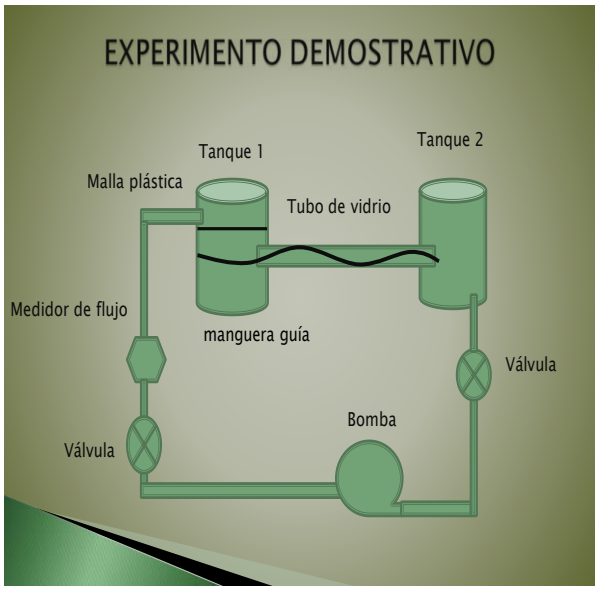


Fig. 3 Experimento demostrativo.
Fuente: Velasco Maite (2013).

Para tomar los datos, se utilizó la lectura apreciativa de 10L (0,1m³) como fija del fluxómetro; la válvula se fue abriendo poco a poco hasta llegar al máximo caudal que podía pasar, se dejo estabilizar la misma en su recorrido para después leer el tiempo con un cronometro, estos valores se tomaron tres veces con el mismo tiempo para asegurar su precisión lo mejor posible.[9]

4.2 Tablas de resultados

Tabla 1: Valores obtenidos en el equipo

video	tiempo (s)	caudal (m³/s)	velocidad (m/s)	Reynolds
1	25,80	3,8760E-04	1,3113	2,4889E04
2	24,80	4,0323E-04	1,3641	2,5893E04
3	22,90	4,3668E-04	1,4773	2,8041E04
4	20,90	4,7847E-04	1,6187	3,0725E04
5	18,80	5,3191E-04	1,7995	3,4157E04
6	17,80	5,6180E-04	1,9006	3,6076E04
7	15,70	6,3694E-04	2,1548	4,0901E04
8	13,70	7,2993E-04	2,4694	4,6872E04
9	12,50	8,0000E-04	2,7065	5,1372E04
10	10,50	9,5238E-04	3,2220	6,1157E04
11	10,05	9,9502E-04	3,3662	6,3896E04
12	9,50	1,0526E-03	3,5611	6,7595E04
13	9,10	1,0989E-03	3,7177	7,0566E04
14	8,50	1,1765E-03	3,9801	7,5548E04
15	8,10	1,2346E-03	4,1766	7,9278E04
16	7,50	1,3333E-03	4,5108	8,5621E04
17	7,10	1,4085E-03	4,7649	9,0444E04
18	6,50	1,5385E-03	5,2047	9,8793E04
19	6,15	1,6260E-03	5,5009	1,0441E05
20	5,50	1,8182E-03	6,1510	1,1675E05
21	5,15	1,9417E-03	6,5691	1,2469E05
22	4,15	2,4096E-03	8,1520	1,5473E05

Fuente: Velasco Maite (2013).

Tabla 2: Resultado de las mediciones realizadas en las fotos.

video	ciclos	frecuencia(s)	Periodo(1/s)	Amplitud(mm)
1	34	0,2941	3,4002	6,30
2	30	0,3333	3,0003	3,74
3	35	0,2857	3,5001	5,48
4	33	0,3030	3,3003	4,67
5	34	0,2941	3,4002	3,97
6	33	0,3030	3,3003	5,22
7	34	0,2941	3,4002	5,04
8	32	0,3125	3,2000	7,22
9	33	0,3030	3,3003	4,95
10	31	0,3225	3,1007	7,56
11	25	0,4000	2,5000	3,57
12	29	0,3448	2,9002	5,66
13	26	0,3846	2,6001	6,45
14	30	0,3333	3,0003	5,19
15	29	0,3448	2,9002	4,30
16	33	0,3030	3,3003	3,94
17	31	0,3225	3,1007	5,61
18	31	0,3225	3,1007	7,91
19	25	0,4000	2,5000	6,20
20	32	0,3125	3,2000	4,48
21	32	0,3125	3,2000	5,30
22	31	0,3225	3,1007	5,05

Fuente: Velasco Maite (2013).

Para conocer la vibración de la tubería, en función de los diferentes parámetros medidos y calculados, se trazan varias curvas, aproximadas, debido a que la apreciación de los instrumentos utilizados introduce errores en los datos obtenidos.

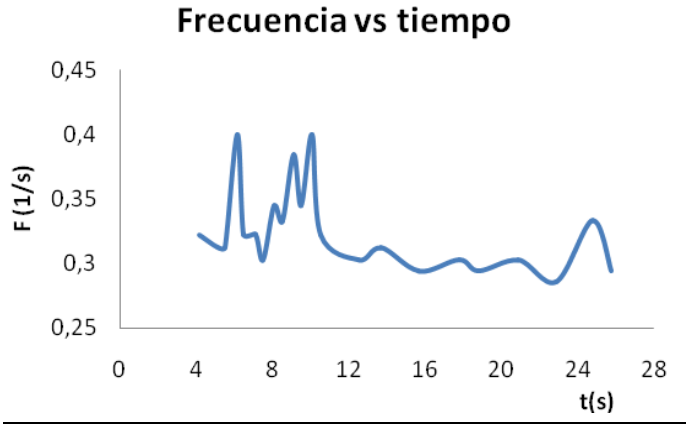


Fig.4.Variacion de la frecuencia vs tiempo

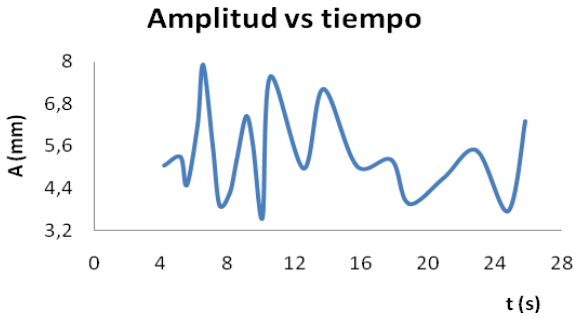


Fig.5. Variación de la amplitud vs tiempo

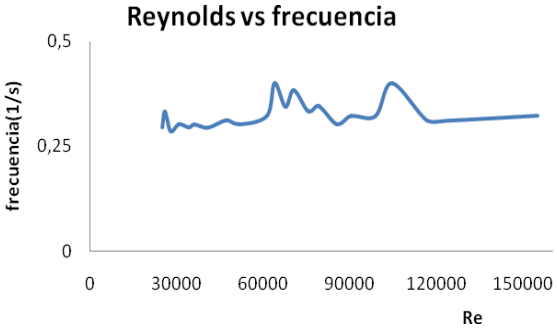


Fig. 6. Variación de la frecuencia vs número de Reynolds

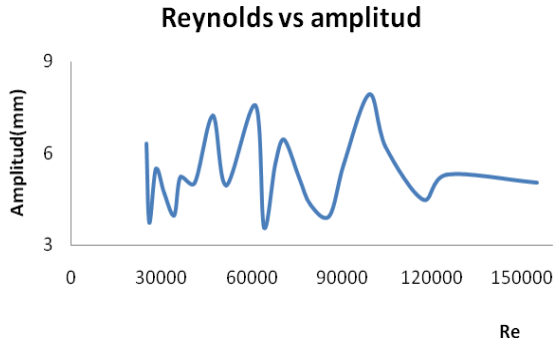


Fig. 7. Variación de la amplitud vs número de Reynolds.

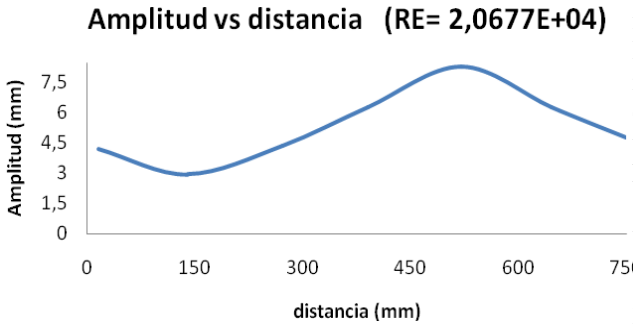


Fig. 8. Variación de la amplitud vs distancia (para un Reynolds específico)

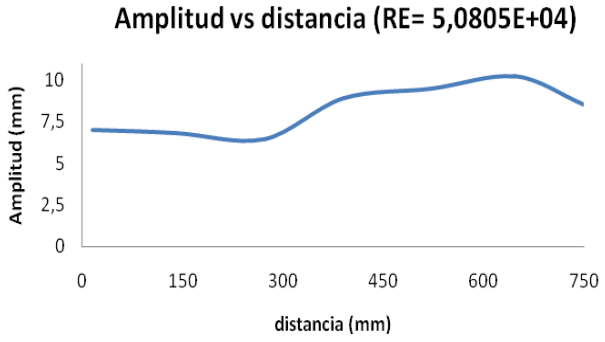


Fig.9. Variación de la amplitud vs distancia (para un Reynolds específico)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los parámetros de vibraciones que se midieron fueron la amplitud y la frecuencia. Estas medidas fueron tomadas directamente de las fotografías generadas en el experimento. Ambos se graficaron en función del número de Reynolds y la amplitud en función de la longitud de la cuerda. Al observar las figuras 4 y 5, se nota la presencia de vibración. La variación inicial y posterior tendencia a la estabilización de la frecuencia corresponde a la figura 4. En la fig. 5, la amplitud del desplazamiento muestra una tendencia menor a la estabilización, sin embargo el fenómeno vibratorio se presenta claramente en la tubería. En la figura 6, se observa que para Reynolds elevados, la frecuencia se estabiliza en aproximadamente 0.3 Hz., También, en la figura 7 puede verse que a medida que se va aumentando la cantidad de flujo en la tubería, la misma variará su amplitud y tenderá a estabilizarse poco a poco para Re altos. En las figuras 8 y 9, se observa la variación de la amplitud para Re específicos. Aquí, la amplitud tiende a estabilizarse para el número de Re mayor. Claramente, un experimento tan sencillo muestra, graficando apropiadamente los parámetros vibratorios, que es importante considerar el fenómeno vibratorio en tuberías que manejen flujo turbulento de fluido. En este estudio a partir del video N° 10 ambos parámetros (frecuencia y amplitud) tienden a estabilizarse a medida que el fluido va aumentando.

6. CONCLUSIONES

Con la realización del experimento se pudo visualizar el fenómeno vibratorio que ocurre en una tubería horizontal debido al flujo turbulento de agua (anexos). El uso de una manguera como una traza del fluido, permitió la visualización, la fotografía y la medición del fenómeno. La precisión de las mediciones fue afectada por el espesor de la manguera que ocupó un espacio dentro del tubo.

Tanto la amplitud de la vibración, como su frecuencia, mostraron tendencia de estabilización a medida que se aumentaba el número de Reynolds. La vibración a lo largo de la tubería, mostró valores promedio de amplitud crecientes a medida

que se aumentó el número de Reynolds. Es decir, la estructura de la tubería estará sometida a fuerzas y deflexiones mayores a medida que se incrementa el flujo de fluido.

7. REFERENCIAS.

Shuaijun L., Bryan W.K., Gongmin L. (2015). *FSI research in pipeline systems – A review of the literature.* Journal of Fluids and Structures 57.

Peter V., Leonid F. (2003). *Analytical Study of Piping Flow-Induced Vibration. Example of Implementation.* 17th International Conference on STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY Prague, Czech Republic.

R. W. Gregory and M. P. Païdoussis. (1966). *"Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid.I. Theory".* The Royal Society.

R. W. Gregory and M. P. Païdoussis (1966). *"Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid.II. Experiments".* The Royal Society.

M.P.Païdoussis and N.T. Issid (1974). *Dynamics Stability of pipes conveying fluid".* Journal of Sound and Vibration (33)

Eduard N., Donald R. (2005). "*Flow-induced vibrations*. An Engineering Guide". Dover Publications, INC. Mineola, New York Glen White. (2010). "Introducción al Análisis de Vibraciones". *Azima DLI*.

Robert D. Blevins. (1986). "Flow-Induced Vibration". *Robert E. Krieger Publishing Company. Malabar. Florida,* 287- 312.

A.P. French. (1974). *"Vibraciones y Ondas".* The Massachusetts Institute of Technology.

Maite M. Velasco. (2013). *"Análisis del movimiento ondulatorio de un flujo turbulento, capaz de producir vibraciones dentro de una tubería horizontal".* Tesis de Maestría. Universidad de los Andes. Ula-Merida. Venezuela.

8. ANEXOS.

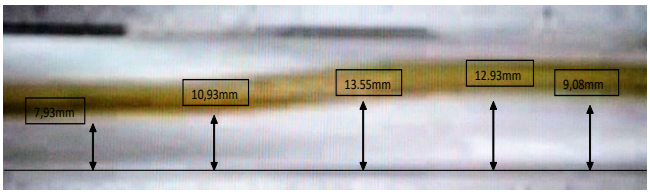


Fig. 10 Visualización del movimiento del fluido dentro de la tubería para un t=24,8s

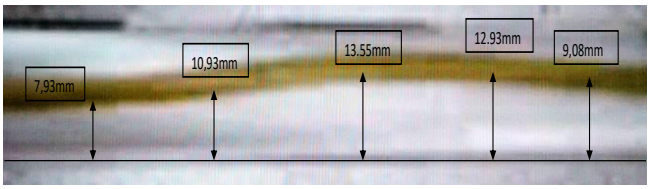


Fig. 11. Visualización del movimiento del fluido dentro de la tubería para un t=25,8s

MODELADO Y SIMULACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN ECUADOR

MODELING AND SIMULATION OF OPERATING PARAMETERS FOR AN ELECTRICAL VEHICLE IN ECUADOR

MSc. Renato Fierro[*], MSc Adrián Sigüenza R [**], PhD. Mary Vergara[***]

[*]**Universidad Politécnica Salesiana,** Carrera de Ingeniería Automotriz, Chambers y 5 de Junio, Guayaquil, Ecuador
+593995818728
E-mail: pfierro@ups.edu.ec
[**]**Universidad Politécnica Salesiana**, Carrera de Ingeniería Automotriz, Calle Vieja y Elia Liut, Cuenca Ecuador
+593993649718
E-mail: asiguanza@ups.edu.ec
[***]**Universidad Nacional de Loja**, Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Carrera de Ingeniería en Mecánica Automotriz, Avenida Pio Jaramillo Alvarado, Loja, Ecuador
+582742402934.
E-mail:vmaryjose@gmail.com

Resumen: En este estudio se desarrolla una herramienta que permite calcular el consumo de autonomía de un vehículo eléctrico previo al recorrido de una ruta pre establecida, según distintos parámetros como son: altimetría, distancia recorrida, aceleración, velocidad del motor, etc. y otros aspectos constructivos, funcionales y tecnológicos a lo largo de un determinado ciclo de conducción estandarizado e implementado en la ciudad de Cuenca – Ecuador. Se desarrolla un modelo numérico matemático para el cálculo de la Autonomía disponible de un vehículo eléctrico, mediante regresión múltiple para modelar la relación de dos a cinco variables independientes en la definición de una variable dependiente. Para la selección del tipo de modelo numérico matemático, se realiza regresiones por cada variable enfrentada a autonomía consumida. Se elabora un algoritmo que es programado en Matlab y una interfaz de usuario que permite la introducción de las variables manejadas por el usuario de la aplicación. Los resultados obtenidos se validan por medio de simulaciones con datos de vehículos en recorridos reales

Palabras clave: Modelación Matemática, vehículo eléctrico, autonomía, regresiones

Abstract: This study develops a tool that allows to calculate the autonomy of an electric vehicle prior to the route of a pre-established route, according to different parameters such as: altimetry, distance traveled, acceleration, engine speed, etc. and other constructive, functional and technological aspects along a certain standardized driving cycle, which was implemented in the city of Cuenca - Ecuador. A mathematical numerical model is developed for the calculation of the autonomy of an electric vehicle, by means of multiple regression to model the relationship of two to five independent variables in the definition of one dependent variable. For the selection of the type of mathematical numerical model, regressions are made for each variable faced with consumed autonomy. A Matlab-programmed algorithm is elaborated, as well as a user interface that allows the introduction of the variables handled by the user of the application. The results obtained are validated by means of simulations with data from vehicles on actual routes.

Keywords: Mathematical modeling, electric vehicle, autonomy, regressions

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de simulaciones matemáticas es una herramienta muy potente a la hora de llevar a la práctica conocimientos adquiridos de forma teórica, pues permite ver el posible comportamiento de costosos sistemas desde un ordenador y sin la necesidad de realizar complejos montajes. Para determinados estudios, podrían existir limitaciones tanto físicas como económicas de poder realizar prácticas con material real y en el caso de un vehículo eléctrico sería determinar el modelo matemático que permita simular las condiciones de funcionamiento de estos. Dentro del proceso de simulación de parámetros de funcionamiento del vehículo eléctrico (Electric Vehicle EV) se considera la aplicación de programas computacionales, que facilitan la validación de modelos numérico matemáticos, obtenidos a través de la conceptualización matemática del funcionamiento de los diferentes bloques que constituyen la generación y transmisión del movimiento, desde el motor hacia las ruedas, enfocados en dar una respuesta a un ciclo de conducción cuyo resultado sea una aproximación del ciclo de vida del vehículo mediante una interfaz gráfica. El vehículo eléctrico en su generación y transmisión del movimiento está constituido por un conjunto de sistemas, véase Figura 1, responsables de generar la traslación de este; dichos sistemas en un proceso de simulación establecen un análisis a través de diferentes programas computacionales específicos para cada componente.

Actualmente los vehículos de propulsión por sistemas no tradicionales (Combustión Interna), consisten principalmente en vehículos eléctricos, híbridos eléctricos y de celdas de combustible los cuales cuentan con un sistema de control que garantizan funcionamiento y un nivel de autonomía que satisfaga las necesidades del conductor. Los EV en función de este requerimiento se ha venido aplicando algunas tecnologías para las baterías como Ion Litio, Hierro Fosfato o Níquel Metal; y se comercializan principalmente en Estados Unidos, Japón, Europa e India.

En 2016 desarrolló una "*Metodología de co-simulación dinámica para vehículos híbridos y eléctricos"* basado en MBS3D 2.0, que es un programa computacional para simulación dinámica de sistemas multicuerpo. El programa computacional realiza la simulación simultanea del modelo mecánico con el modelo del tren de potencia de un vehículo hibrido o eléctrico; se aplica metodología de co simulación al modelo matemático de un EV donde se involucran todos los sub modelos de los sistemas: motor eléctrico DC excitado, paquete de baterías Li-ion, convertidor AC/DC y un modelo multicuerpo. En la mayor parte de estudios de modelado de VE utilizan dos metodologías: un enfoque cuasi estático y un enfoque Dinámico. En el análisis Cuasi estático se tiene como entradas: el ciclo de conducción, la velocidad y la aceleración, en base a esto la fuerza motriz es directamente calculada y luego se obtiene el torque del motor, la velocidad rotacional es interpretada a través de la interpretación del mapa de eficiencia.

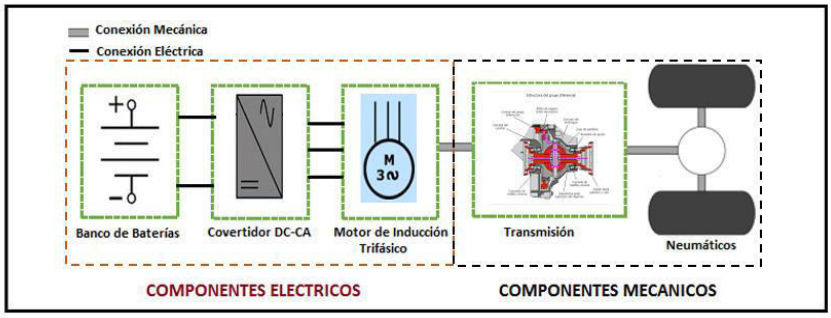


Figura. 1 Diagrama de Bloques del Vehículo Eléctrico

En el sistema de co simulación desarrollado se aplica el enfoque dinámico, donde sus entradas son la aceleración y los comandos de freno del conductor los cuales se traducen en el torque entregado al motor; el torque es entrada para la transmisión y pasa a través de los neumáticos en la dirección del flujo del tren de tracción. El VE es modelado con una serie de ecuaciones diferenciales ordinarias o ecuaciones diferenciales algebraicas. El comportamiento está definido por el sistema de ecuaciones definidas en la modelación. La selección de ecuaciones para los componentes se realizó de la siguiente manera: ecuaciones diferenciales ordinarias incluso diferenciales algebraicas para el motor eléctrico, en el caso de las baterías se eligió un modelo de circuito eléctrico equivalente a partir de un conjunto de ecuaciones diferenciales fácilmente reducibles. Estas ecuaciones son los requisitos para el proceso de co simulación en el programa computacional MBS3D 2.0.

En el trabajo de "*Modelado de Vehículo eléctrico en un trayecto típico de la ciudad de Quito"* (J, 2015) realizado en 2015 se utiliza el método EMR (Energetic Macroscopic Representation) a partir de medidas GPS para el modelado en Simulink y simulación de potencia y energía consumida en el recorrido de un vehículo de combustión que representarían el consumo de EV. El sistema EMR es un modelo de análisis de sistema energéticos que permite obtener u n modelo en tiempo real y posee principios de resolución que son el de interacción y causalidad. Mediante la interacción de los bloques se obtiene el modelo final que se simula en Simulink obteniéndose el perfil de distancia recorrida en función del tiempo, curvas de potencia y de energía consumida, lo que permite tener una idea del consumo energético de un EV en la ciudad.

Existe otro trabajo de "*Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo eléctrico propulsado por pilas de combustible. Análisis Económico y de factibilidad* (Peremulter, 2014)*"*, se desarrollaron ciclos de manejo y perfiles de elevación a través de datos recogidos en el recorrido de un EV en la ciudad de Córdova, Argentina. En función de la interacción de los sistemas se establece el modelo, para lo cual se considera: Fuente (pila de combustible), conversor, inversor, motor/generador eléctrico y diferencial; para simular el consumo energético se consideraron los efectos de rodadura de la rueda, la fuerza gravitatoria en una pendiente y de resistencia aerodinámica las cuales se modelan como fuerzas aplicadas al EV. El modelo de descarga se obtiene en base a la curva experimental de descarga para diferentes tasas y temperaturas y se corrigen los datos en MatLab. El modelo de celda de combustible es capaz de caracterizar los fenómenos transitorios incorporando: cambio de temperatura de la pila de combustible, cambio de flujo en los canales, y respuesta dinámica en términos del efecto capacitivo de las capas dobles de carga en los electrodos de la pila, lo que permite describir efectos térmicos, fluido-dinámicos y comportamiento electroquímico, se realiza la compensación del sistema en Simulink utilizando el método de Ziegler Nichols en lazo abierto y lugar de raíces. Finalmente se realizan las simulaciones sobre el modelo completo previamente ensamblado con los modelos obteniéndose resultados de velocidad y altura desarrollados, torque y potencia, tensión y corriente en la pila, tensión y corriente en el motor, y tensión y corriente en la batería.

En otro trabajo de investigación denominado: "Análisis estadístico de ciclos urbanos reales para modelado de consumo energético de vehículos eléctricos" (Bartlomiej Onde, 2016) realizado en 2016, se determina la relación entre la velocidad media y la estadística que describe el perfil de velocidad en diferentes ciclos de conducción. Los Parámetros considerados: velocidad media, aceleración/ desaceleración media, con el objeto de crear un modelo macroscópico velocidad promedio consumo energético de un VE. Para el modelo macroscópico de consumo energético: la ruta es segmentada y se representa en un gráfico satelital de la que se determina el consumo; el trafico será considerado al modelar el consumo como una función de velocidad de conducción como experiencia /expectativa en la ruta. Para la adquisición de datos: se realiza la recolección de coordenadas y velocidad a través de GPS en trayectos diarios realizados por 4 conductores de 10:00 a 15:00 en días laborables, se realizaron 53 viajes con distancias de 900 m a 13.5 km; los trayectos fueron divididos en 1217 tramos de 10 m a 2550m con una media de 300 m. Posteriormente se calcula estadísticamente para cada tramo y luego se aproxima como una función de tiempo:

A.) Calculo de la velocidad media de cada tramo, y otros datos corrientes media, consumo

energético, desviación estándar de la velocidad, aceleración y desaceleración media, número de paradas

B.) Analizar el comportamiento de los datos graficados y su relación con la velocidad media

C.) Aproximar los datos a una función de velocidad media

Dado que tanto el consumo de energía y la potencia no se midieron durante los recorridos de prueba, los perfiles de velocidad fueron utilizados para estimar estos valores a través de la simulación del modelo de mirando hacia atrás [Mohan, Assadian y Longo 2012] de la dinámica longitudinal de un VE. Se determinan las relaciones entre la velocidad media y el consumo de energía, la aceleración, la velocidad máxima y mínima, etc., y luego se aplica para los ciclos de conducción registrados. Para estimar el consumo de energético, un modelo microscópico de un tren de transmisión del VE y un modelo de fuente de poder fue construido y utilizado con los perfiles de velocidad registrados. Por último, pero no menos importante; este tipo de modelo de consumo de energía se puede aplicar a la planificación de rutas.

La metodología de correlaciones es utilizada para la reducción de variables de estudio, pues no todas las variables aportaran información significativa al modelo numérico matemático; la metodología de correlaciones utilizada en este estudio es aquella en la que se define el coeficiente de correlación de Pearson, que es una medida de regresión para cuantificar el grado de variación conjunta entre dos variables.

La correlación de Person se define como el número que mide el grado de intensidad y el sentido de la relación entre dos variables, que están determinados por comportamientos similares**,** definiendo de esta manera que hay una relación de dependencia entre ellas. Para medir este grado de dependencia se utiliza la definición del índice de Pearson[1].

Bajo la luz de lo anterior, es importante resaltar que en este trabajo de investigación se usa un modelo estadístico de tendencia de comportamiento de datos en secciones para obtener un modelo del consumo energético considerando los factores de funcionamiento del VE

2. VARIABLES INTEGRANTES EN LA SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Las variables que se presumen inciden en la autonomía del vehículo eléctrico (VE) se pueden dividir en:

Variables de funcionamiento del Sistema: se deberá obtener todas las magnitudes medidas en los 4 sistemas principales del VE: batería, convertidor, inversor y motor eléctrico

Variables de entrada del conductor: son las condiciones que el operador del VE varia a voluntad de acuerdo al recorrido, modo de manejo y agentes externos de la ruta

Variables de característica de la ruta: variables que caracterizan geométricamente y por legislación al recorrido.

Actualmente se han desarrollado diferentes herramientas informáticas que permiten la simulación de diferentes condiciones: físicas, mecánicas, eléctricas, etc; en función de establecer condiciones iniciales y variables que rigen o condicional los fenómenos mencionados; ellos se basan en análisis numérico matemáticos y estimaciones relacionadas a una interfaz gráfica para representación de resultados. Ningún software actual permite trabajar con variables operativas o de control humano (factores que puedan ser regidos o contralados por la habilidad o destreza humana); debido a la inestabilidad de estos datos

3. INTERFACES PARA EXTRACCIÓN DE DATOS

Todos los vehículos eléctricos que actualmente se comercializan cuentan con un puerto de diagnóstico a bordo (OBD2), que permite tener acceso a los diferentes parámetros de funcionamiento recolectados a través de sensores o controladores, permitiendo determinar fallos eléctricos, químicos o mecánicos, según las características específicas de cada vehículo.

Cada fabricante puede extraer estos datos a través de programa computacional de diagnóstico desarrollados, y procesarlos en función de la información que se desea obtener; así mismo existen interfaces genéricas que pueden aplicarse a

[1] Índice de Correlaciones de medida entre dos variables lineales, aleatorias cuantitativas, (Benalcázar 2002)

las diferentes marcas para obtener parámetros generales como por ejemplo el Launch X431 que **es** compatible con programación, codificación y funciones especiales comunes de módulos programables para la mayoría de marcas vehiculares

La universidad Politécnica Salesiana ha desarrollado el Programa Computacional Emolab[2] como un Sistema de adquisición de variables de funcionamiento del VE EMOLAB, a través del protocolo de diagnóstico OBDII. Para ello se desarrolló una plataforma a través de LABVIEW[3] que permite realizar el registro de datos, desentramado e identificación de los mismos; el enlace se realiza vía bluetooth[4] mediante un módulo de diagnóstico comercial de bajo costo. De la cual se obtiene los datos indicados en la Tabla 1

Tabla 1. Variables Obtenidas a través de Programa Computacional EMOLAB

VARIABLE	UNIDAD
Posición de pedal de aceleración	%
Velocidad de recorrido	km/hr
Estado de carga	%
Corriente de la batería	A
Voltaje de baria	V
Voltaje de batería auxiliar	V
Vel del motor rpm	rpm
Corriente del motor	arms
torque del motor	N.m
torque estimado	N.m
Temperatura Motor	°C
Temperatura MCU (Motor Control Unit)	°C
Temperatura del disipador del motor	°C
Potencia de carga	kW
Potencia de descarga Kw	KW
Corriente carga acumulada	A/hr
Corriente de descarga acumulada	A/hr
Energía de carga acumula	kwh
Energía de descarga acumulada	kwh
Tiempo de operación acumulado	s
Voltaje del capacitor de inversor	V
Temperatura módulo 1 al 8	°C
Voltaje máx. de Celdas	V
Voltaje min de celdas	V
Modos de conducción	Drive / Brake

[2] Programa Computacional de adquisición de datos del vehículo eléctrico EMOLAB de la UPS, desarrollado por Paul Ortiz
[3] **LabVIEW**: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench,plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico
[4] Tecnología inalámbrica de ondas de radio corto

4. DEFINICIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO

Usando el criterio de correlaciones de Pearson, se define cuál es la incidencia que cada variable extraída por EMoLAb, tiene en relación al consumo de autonomía producido en las rutas específicas, que dan como resulta que las 28 primeras variables son las más incidentes lo cual se puede mirar en la tabla Resumen de Coeficiente de correlaciones de Karl Pearson (Pita Fernández S., 2002), sin embargo este análisis se realiza considerando al consumo de autonomía, como la única variable dependiente, sin embrago, bajo criterio tecnológico es claro ver que entre esas variable se puede generar una fuerte relación, que permite simplificar el estudio de variables, es por eso que el método de correlaciones define que:

a. Si se analiza mediante correlaciones el recorrido frente a todas las variables se obtiene:

Tabla 2: Resumen de Coeficiente de correlaciones de Karl Pearson Para Recorrido

Variable	*Recorrido*
Cumulative Charge Energy [kWH]	0.99894803
Cumulative Charge Current [Ah]	0.99873447
Cumulative Discharge Energy [kWH]	0.99783748
Cumulative Discharge Current [Ah]	0.99739531
Battery Min Temperature	0.97380784

[°C]	
Battery Max Temperature [°C]	0.96871297
Battery Module 8 Temperature [°C]	0.96701886
Battery Module 5 Temperature [°C]	0.96496906
Battery Inlet Temperature [°C]	0.96373962
Battery Module 2 Temperature [°C]	0.96048985
Battery Module 1 Temperature [°C]	0.95922916
Battery Module 7 Temperature [°C]	0.95724006
Battery Module 4 Temperature [°C]	0.95223502
Battery Module 3 Temperature [°C]	0.95033618
Battery Module 6 Temperature [°C]	0.95018972
Battery DC Voltage [V]	-0.94280065
Max Cell Voltage [V]	-0.93888698
Min Cell Voltage [V]	-0.93683305
Inverter Capacitor Voltage [V]	-0.93435219
Motor Temperature [°C]	0.85959974
Available Charge Power [KW]	0.85392058
Head Sink Temperature [°C]	0.69243529
Min Cell Voltage [No,]	0.50440822

Donde la variable recorrido, se llega a definir una variable principal que sustituye a las presentadas en la tabla anterior, esto se corrobora con criterio tecnológico pues esta es de carácter medible y controlable a voluntad del conductor, además que de acuerdo a la Tabla 2 no tiene correlación;

a. La variable de driver motor speed, es una variable principal de:

Tabla 3: Resumen de Coeficiente de correlaciones de Karl Pearson Para Drive Motor Speed

Variable	***Drive Motor Speed [rpm]***
Speed [Kmh]	0.999740134
Motor Actual Speed [rpm]	0.999544389
Groundspeed[m/s]	0.699919999

b. La aceleración se define como variable principal de:

Tabla 4: Resumen de Coeficiente de correlaciones de Karl Pearson Para Accel Pedal

Variable	***Accel Pedal [%]***
Battery Current [A]	0.849718642
Estimated Motor Torque [Nm]	0.808638374
Motor Torque Command [Nm]	0.807614151
Motor Phase Current [A]	0.685479445
Max Cell Voltage [No,]	-0.559124107

c. El ángulo de inclinación se define como variable principal de:

Tabla 5: Resumen de Coeficiente de correlaciones de Karl Pearson Para Ángulo de Inclinación

Variable	***Angulo de inclinación***
cambios de altura	0.812793946
Alt (relativ) [m]	0.812791208
Available Charge Power [KW]	-0.528172528
Head Sink Temperature [°C]	-0.510764235

Considerando la definición de variables principales mediante los análisis de correlaciones se obtiene que las variables requeridas para este estudio son:

Tabla 6: Variables Principales para el estudio

Variable	*autonomía consumida (km)*
Recorrido	0.994490822
Tiempo Trayecto	0.968004247
Angulo de inclinación	-0.202720938
Motor Actual Speed [rpm]	0.18039634
Accel Pedal [%]	0.082585042

5. RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la recolección de datos se debe establecer un protocolo de pruebas específico para este estudio, con el fin de reducir el número de variables para el modelo matemático; este considera los siguientes aspectos:

- Rutas pre establecidas, de acuerdo a experiencias de usuarios urbanos
- Condiciones de funcionamiento, manipulables por el conductor

Rutas Pre establecidas: De los diferentes recorridos urbanos del VE Emolab se consideran las siguientes condiciones para establecer las rutas: congestión vehicular, intersecciones, vías típicas de mayor recorrido, pendientes (máximas/mínimas), límites de velocidad y tipo de calzada en la Ciudad de Cuenca Ecuador. Se definieron y caracterizaron 7 rutas urbanas para la recolección de datos con: descripción de la red vial básica, características geométricas, especificaciones técnicas y mapa de cada una. Las rutas establecidas se diferencian entre si básicamente en velocidades permitidas, variación de pendiente en los tramos, distancia recorridas, pero sobretodo en los tipos de conexiones que estas permiten, es decir una diferenciación geográfica, lo que permite establecer el comportamiento de la autonomía en escenarios diversos pero típicos para la ciudad

6. VARIABLES OBTENIDAS DEL SISTEMA

El software Emolab permite recolectar alrededor 8456 datos en todas las rutas; con una frecuencia de 1 segundo, en un recorrido en cada una de las 7 rutas pre establecidas. Posteriormente se filtran los datos a fin de despreciar rangos, que no presentan variación significativa en su sucesión; con lo que se estable una base de 122 datos, lo que constituye una muestra útil para establecer el modelo numérico matemático como una estimación de gran fuerza.

Posterior a la obtención de datos de VE, algunas variables deben ser procesadas para definir una forma correcta para poder ser utilizadas en la obtención del modelo numérico matemático que aproxima a la definición de autonomía del VE, estas son:

a. El tiempo recorrido se registra como el instante que se extrae el dato, es decir en formato hh:mm:ss, se transforma al tiempo transcurrido en hora decimal desde el instante 0 de partida de la ruta

b. El recorrido obtenido a través del hodómetro que registra desde la partida inaugural de VE, requiere ser transformado a kilometraje recorrido en la ruta desde la partida 0 km.

c. El índice de carga (% SOC) se transforma en kilómetros consumidos

d. La altimetría registrada en el GPS[5] se transforma en un ángulo de inclinación de la vía durante la trayectoria; calculado a través de la pendiente entre instantes del recorrido

Al procesar la información emitida por Emolab sin estas transformaciones, el índice de confianza de la regresión obtenida se encuentra en el 23% lo cual no garantiza su eficiencia; por ello se procede a este procesamiento de datos que generan adaptación de las variables en estudio, encontrando un resultado con un grado de confianza 95.36% (análisis estadístico, análisis de residuo, comportamiento de normalidad)

7. MODELO MATEMÁTICO DE LOS FACTORES DE FUNCIONAMIENTO DEL VE:

Considerando el número de variables de estudio obtenidas en el análisis de Pearson, se procede a la generación de un modelo numérico matemático, que sugiere la utilización de una regresión múltiple la cual es importante, para modelar la relación de dos a cinco variables independientes en la definición de una variable dependiente.

Dentro de la obtención de regresiones como modelo numérico matemáticos existen diferentes

[5] GPS Global Position System registrada en el instrumento Garmin GPS Map 64

metodologías para generar está, de las que se destacan aquellas que consideran una regresión lineal múltiple y la de mínimos cuadrados, que se consideran según el comportamiento de información utilizada para generar el modelo.

Para la selección del tipo de modelo numérico matemático, se realiza regresiones por cada variable enfrentada a autonomía consumida, de estas se observa que las aproximaciones de tipo cuadrática son aquellas que se ajustan mejor a la definición de regresión.

Modelo de regresión cuadrática por variable

Antes de definir un modelo numérico matemático multivariable se debe generar un análisis de comportamiento de la autonomía para cada variable de estudio con la finalidad de establecer cuál sería la mejor aproximación de un análisis múltiple, es por esta razón que para cada variable se considerara la definición de una regresión cuadrática cuya función está definida por:

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

Ecuación 3: *Ecuación general de la parábola*
Fuente: Geometría analítica de Lehmann, 1989

Como se puede observar esta ecuación tiende a un comportamiento parabólico, que representa una aproximación real de una dispersión de puntos, sin embargo las constantes A,B,C no están definidas, por tal se debe cambiar la función a un sistema de ecuaciones que se encuentran normalizados, en consideración a un número n de puntos definido como:

$$\sum y = A\sum x^2 + B\sum x + NC$$
$$\sum xy = A\sum x^3 + B\sum x^2 + C\sum x$$
$$\sum x^2y = A\sum x^4 + B\sum x^3 + C\sum x^2$$

Ecuación 4: *Ecuaciones normalizadas para regresiones cuadráticas simples*
Fuente: J. lejarza, 2003

En estas ecuaciones a través de la normalización se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, cuya solución define las constantes A, B y C; que definen un modelo de regresión adaptada a la dispersión de puntos de alguna experimentación, el mismo se encuentra sometido a un grado de desviación que está definido por la determinación del grado de ajuste donde se debe considerar la aplicación de la función:

$$r^2 = \frac{B*\left(\sum xy - \frac{(\sum x)*(\sum y)}{n}\right) + C*\left(\sum x^2 y - \frac{(\sum x^2)*(\sum y)}{n}\right)}{\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}}$$

Ecuación 5: *Función Grado de confianza de la regresión*

De esta función se mide el grado de confianza que tiene la regresión como modelo ajustado a los datos analizados, y se sabe que la aproximación de r muy cercana a uno define que el modelo esta correctamente ajustado.

Modelo de regresión cuadrática para consumo de autonomía y tiempo real de recorrido

A=7.123 B=7.338 C=1.334

Se produce una regresión de aproximación con ecuación:

$$y = 7.123x^2 + 7.338x + 1.334$$

Grado de error $r^2 = 0.96$

La dispersión de puntos, así como también la curva ajustada, también se los puede representar gráficamente, a través de la aplicación de programa computacional como minitab[6] tal como se observa en la Figura 2 siguiente:

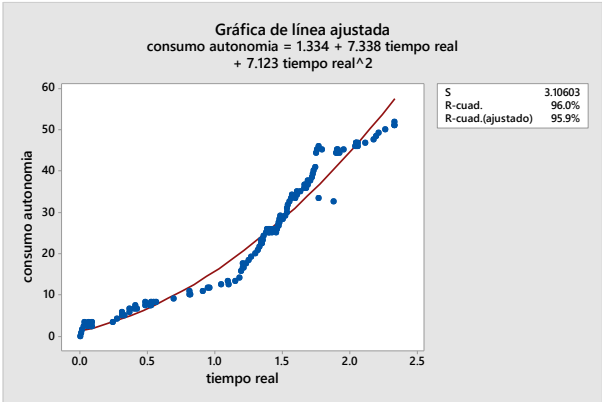


Figura 2: Gráfica de dispersión de puntos y curva de regresión ajustada para consumo de autonomía y tiempo real de recorrido

[6] Minitab: programa de computadora diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. www.minitab.com

Modelo de regresión cuadrática para consumo de autonomía y recorrido

A=0.003276 B=0.7061 C=0.317

Lo que produce una regresión de aproximación con ecuación:

$$y = 0.003276x^2 + 0.7061x + 0.317$$

Grado de error $\mathbf{r^2 = 0.986}$

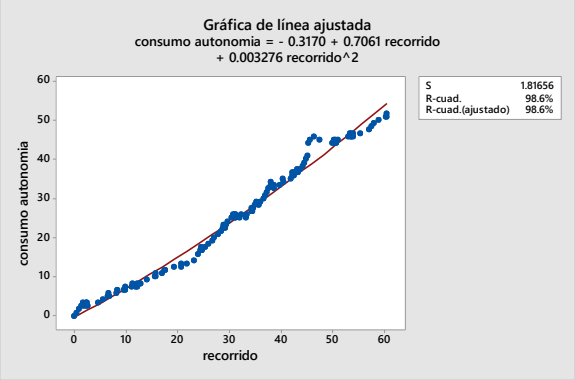


Figura 3: Gráfica de dispersión de puntos y curva de regresión ajustada para consumo de autonomía y recorrido

Modelo de regresión cuadrática para consumo de autonomía y aceleración del pedal

A=-0.008276 B=0.4608 C=21.77

Lo que produce una regresión de aproximación con ecuación:

$$y = -0.008276x^2 + 0.4608x + 21.77$$

Grado de error $\mathbf{r^2 = 0.0013}$

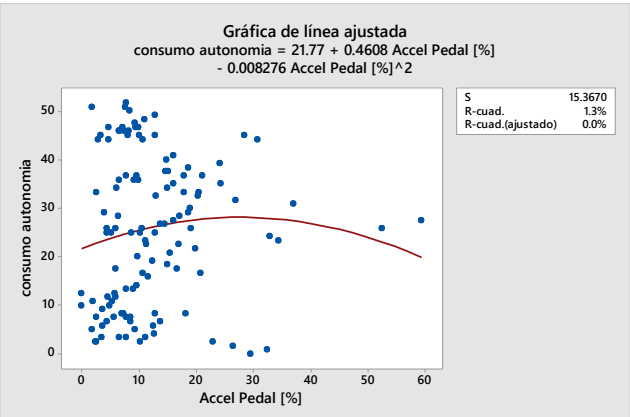


Figura 4: Gráfica de dispersión de puntos y curva de regresión ajustada para consumo de autonomía y recorrido

Modelo de regresión cuadrática para consumo de autonomía y Drive Motor Speed

A=-0.0000001 B=0.003791 C=18.73

Lo que produce una regresión de aproximación con ecuación:

$$y = -0.0000001x^2 + 0.003791x + 18.73$$

Grado de error $\mathbf{r^2 = 0.0035}$

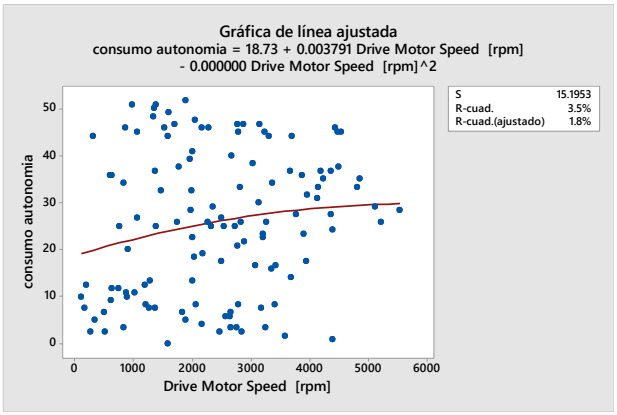


Figura 5: Gráfica de dispersión de puntos y curva de regresión ajustada para consumo de autonomía y Drive Motor Speed

Modelo de regresión cuadrática para consumo de autonomía y ángulo de inclinación

A=-0.000493 B=-0.0128 C=27.38

Lo que produce una regresión de aproximación con ecuación:

$$y = -0.000493x^2 - 0.0128x + 27.38$$

Grado de error $\mathbf{r^2 = 0.0011}$

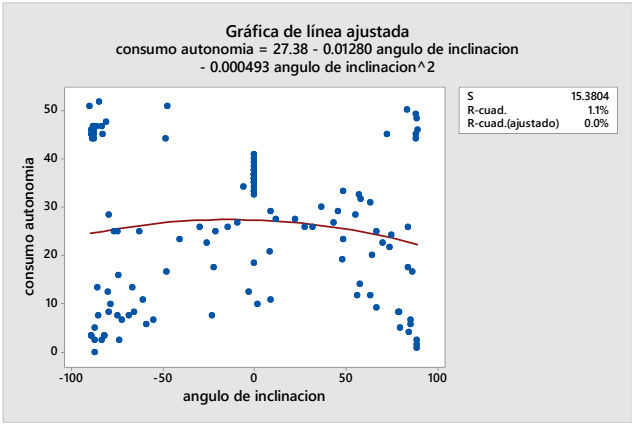


Figura 6: Gráfica de dispersión de puntos y curva de regresión ajustada para consumo de autonomía y ángulo de inclinación

Modelo de regresión cuadrática para consumo de autonomía y las variables del estudio

Finalizado el análisis de regresión cuadrática para consumo de autonomía frente a cada una de las variables, en las cuales se centra este estudio, se visualiza que la mejor aproximación para un análisis multivariado es la regresión cuadrática en la cual se engloba un análisis total para la definición de autonomía.

La regresión multivariable se basa en el mismo principio que de la simple, considerando eso se genera un conjunto de ecuaciones normales que parten de:

$$Y = Ax1^2 + Bx2^2 + Cx3^2 + Dx4^2 + Ex5^2 + Fx1x2 + Gx1x3 + Hx1x4 + Ix1x5 + Jx2x3 + Kx2x4 + Lx2x5 + Mx3x4 + Nx3x5 + Ox4x5 + Px1 + Qx2 + Rx3 + Sx4 + Tx5 + U$$

Ecuación 6: *Función General Autonomía VE*

Donde:

X1: Tiempo de recorrido
X2: Recorrido
X3: Angulo de aceleración
X4: Drive Motor Speed
X5: Ángulo de inclinación
Y las letras desde la A a la U son constantes no definidas

De esta ecuación se obtiene 21 ecuaciones normalizadas se resuelven simultáneamente para determinar los coeficientes desde el A hasta la U con los datos obtenidos experimentalmente, de la cual se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 7: Valores de las constantes normalizadas de la función de autonomía del VE

VARIABLE	VALOR
A≅	0
B≅	0
C≅	0
D≅	0
E≅	0
F≅	0
G=	-0.002355
H≅	0
I=	0.00479
J=	0.000033
K≅	0
L=	0.001151
VARIABLE	VALOR
M=	0.000101
N≅	0
O≅	0
P=	-8
Q=	0.0805
R=	0.000499
S=	1.1665
T=	-0.0152
U=	-1.69

Reemplazando las constantes en la regresión de aproximación se tiene:

$$Y = -0.002355x1x3 + 0.00479x1x5 + 0.000033x2x3 + 0.001151x2x5 + 0.000101x3x4 - 8x1 + 0.0805x2 + 0.000499x3 + 1.1665x4 - 0.0152x5 - 1.69$$

Ecuación 7: *Función que Específica Consumo de Autonomía VE*

La regresión representa una aproximación para la definición de consumo de autonomía que puede explicar 99.34% de la variación, lo que indica que el modelo se ajusta a los datos experimentales de manera eficiente, esto se corrobora cuando se compara el comportamiento de los datos de forma real, con los datos calculados con la regresión Figura 7

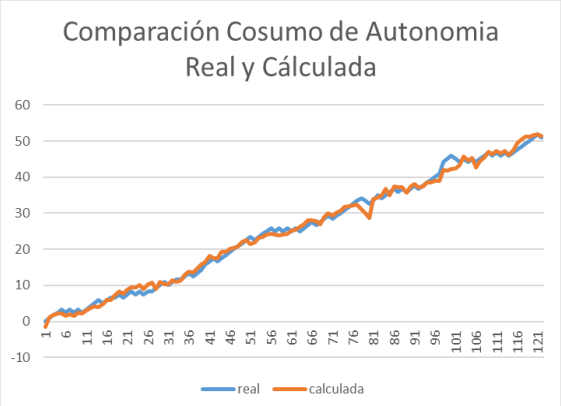


Figura 7: Gráfica de consumo de autonomía real vs calculada en modelo numérico matemático

8. VERIFICACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO

Para validar el modelo se lleva a cabo un conjunto de análisis estadístico que me permiten definir que tan bien se ajusta el modelo numérico matemático a un comportamiento real estos análisis están definidos como:

Análisis de residuos:

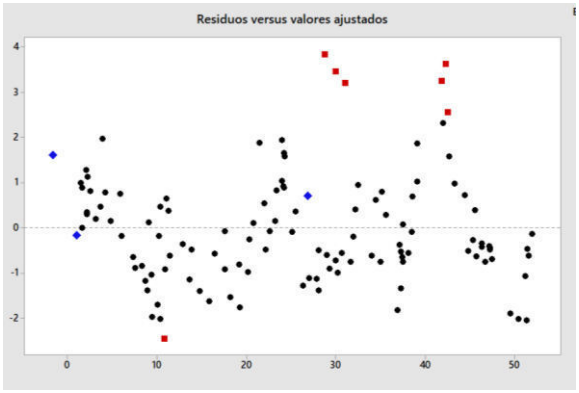


Figura 8: Análisis de residuos

Del análisis de la gráfica representada en la Figura 21 se observa que los datos no siguen ningún patrón lo que indica que el modelo numérico matemático se ajusta bien a un comportamiento real, sin embargo hay que considerar la presencia de siete valores con residuos grandes, que indican que para estos valores el modelo tiene grandes errores aunque se mantienen dentro del límite de confianza pues representan el 5.7% de los valores totales. Existen tres observaciones poco comunes, que pueden influir fuertemente en la ecuación del modelo, sin embargo, se mantiene dentro de lo esperado, pues representan menos del 5% de los valores y sus residuos no son altos

Análisis de efectos principales:

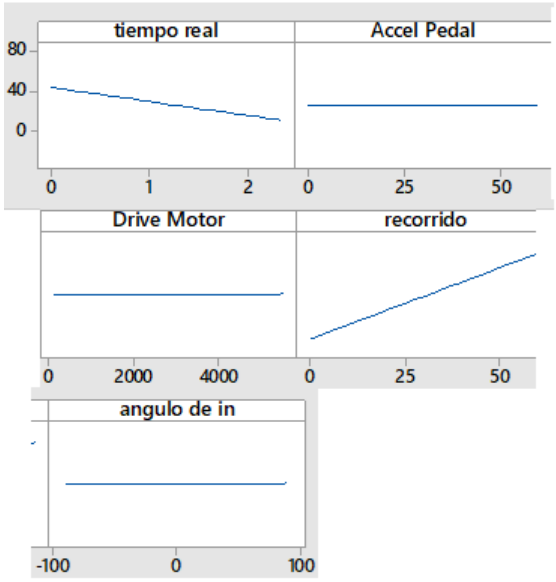


Figura 9: Análisis de efectos principales

En las gráficas de efectos principales (figura 9) , se observa que la variable más influyente para la definición de consumo de autonomía es el recorrido, pues genera cambios que van desde los 0 hasta los 80 km de consumo, y el tiempo real de recorrido que produce cambios de entre los 0 y 40km de consumo aproximadamente; sin embargo, las variables de aceleración del pedal, ángulo de inclinación y driver speed motor no generan variaciones significativas, definiendo que en el modelo numérico matemático los mayores consumos serán producto dela variación de las dos primeras variables, lo cual se puede corroborar con el análisis de efecto incremental (Figura 10)

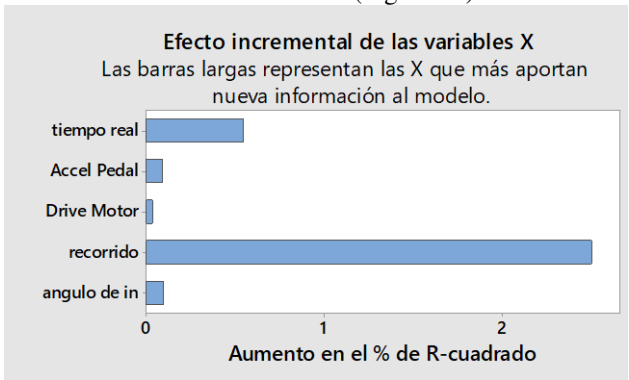


Figura 10: Efecto Incremental de las variables

Análisis de efectos cruzados:

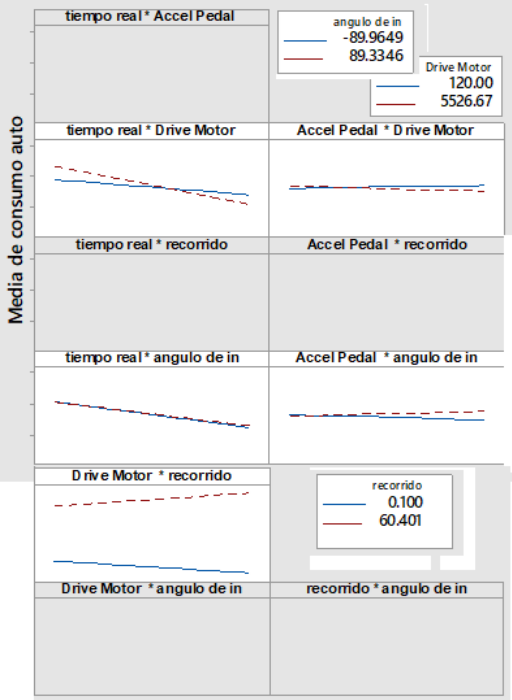


Figura 11: Regresión múltiple para consumo de autonomía

En el análisis de efectos cruzados de la figura 11, se observa que la interacciones entre variables que generan cambios significativos en la definición de consumo de autonomía son: el tiempo real – driver motor speed, tiempo real – recorrido; aceleración – drive motor speed, aceleración del pedal – ángulo de inclinación, y driver motor speed – recorrido, pues generan parte de los cambios significativos por la carencia de un comportamiento normal.

Validación de resultados

La implementación del modelo numérico matemático permite establecer la autonomía del VE Emolab aplicado a rutas prestablecidas de acuerdo a las variables más influyentes; posterior a ello se realiza la verificación de resultados al determinar en campo la autonomía del vehículo en dichas rutas, de las cuales previamente se había calculado su autonomía. Se realizaron 122 pruebas y se obtuvieron resultados interpretados en la gráfica de la Figura 12

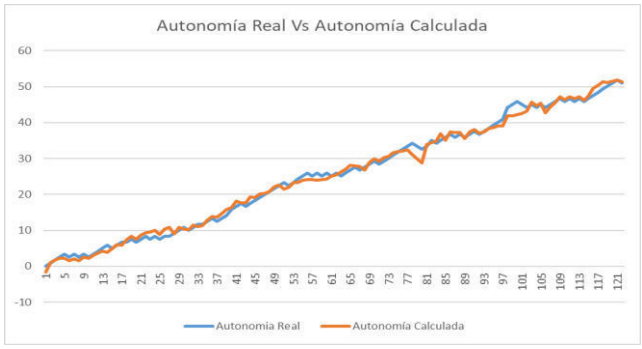


Figura 12: Autonomía Real Vs Autonomía Calculada

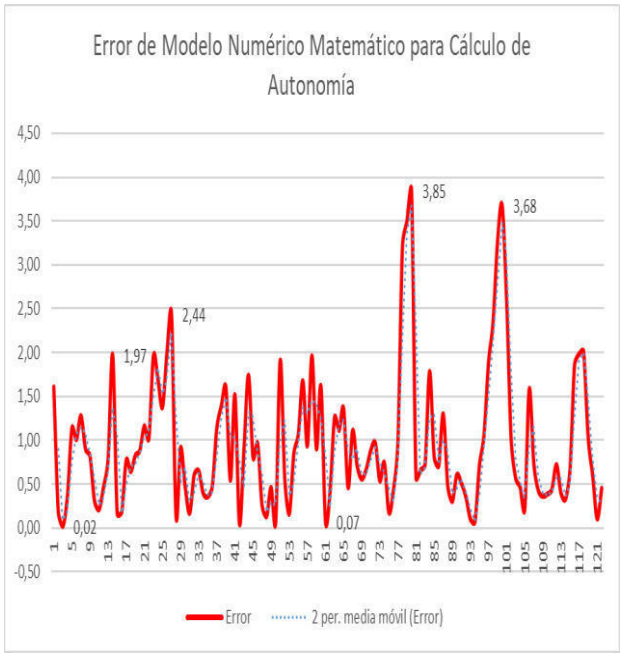


Figura 13: Error de Modelo Numérico Matemático para Cálculo de Autonomía

En la figura 13 se puede observar que el mayor error en el cálculo de autonomía se da en un 3.85% lo que corrobora la utilidad de la propuesta.

9. CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de la investigación se han obtenido varias conclusiones de interés que respaldan la consecución de los objetivos planteados y que pueden resumirse según:

Se identifican y definen las variables más relevantes que inciden en la determinación de la

autonomía de un vehículo eléctrico, lo que permite simular la interacción de parámetros tecnológicos y funcionales

La herramienta computacional desarrollada resulta innovadora, siguiendo un proceso de análisis de datos obtenidos a tiempo real capaz de pronosticar la autonomía de un vehículo eléctrico para ciudades ubicadas por encima de los 2000 metros sobre el nivel del mar.

La validación y verificación del modelo numérico planteado se realiza comparando la autonomía real presentada al final de los recorridos y las registradas en la instrumentación del vehículo. Así, de las 122 experimentaciones realizadas el porcentaje de error permisible más alto ha sido de 3.85%

REFERENCIAS

Bartlomiej Onde, G. S. (2016). Análisis estadístico de ciclos urbanos reales para modelado de consumo energético de vehículos eléctricos.

GLOBALTECH. (2007). *GLOBALTECH*. Obtenido de X431-PRO: http://www.globaltech-car.com/detalle.php?idprd=131

J, C. J. (2015). Modelado de vehículo eléctrico en un trayecto típico de la ciudad de Quito.

Johnson, R. (2012). *Estadistica Elemental.* México DF: CENGAGE Learning.

Lehmann, C. (1989). *Geometría Analítica.* México D.F.: LIMUSA.

Lejarza, J. (2003). *Regresión*. Obtenido de Regresión mínimo cuadrática: https://www.uv.es/ceaces/pdf/regre.pdf

Millan, M. (2016). *Nueva plataforma de ensayo para la caracterización de motores eléctricos In-Wheel para aplicaciones en vehículo eléctrico*. Obtenido de http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-16946#

Municipio de Cuenca. (2015). *Plande Movilidad y Espacios Públicos.* Cuenca.

Peremulter, C. (2014). Dimensionamiento y Modelado de un Vehículo Eléctrico Propulsado por Pilas de Combustible. Análisis Económico y de Factibilidad. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.

Pita Fernández S., P. D. (2002). *Relación entre variables cuantitativas.* Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complexo Hospitalario Juan Canalejo. A Coruña.

Prlan, J. V. (2016). Metodología de co-simulación dinámica para vehículos híbridos y eléctricos.

Qucs. (25 de Diciembre de 2014). Obtenido de Quite Universal Circuit Simulator: http://ccm.net/download/download-16635-quite-universal-circuit-simulator

Sánchez, J. M. (1991). *Introducción A La Estadística Para Administración Y Dirección De Empresas.* Mexico D.F.: MC. Graw- Hill.

PARTE B
Termofluidos y Energía

DISEÑO DEL ÁLABE DE UN AEROGENERADOR HORIZONTAL DE BAJA POTENCIA

DESIGN OF THE BLADE OF A LOW-POWER HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE

Cristhian Leonardo Pabón Rojas[*], PhD. Elkin Flórez S.[*]
PhD. Juan Carlos Serrano Rico[*]

[*] **Universidad de Pamplona,** Ingenierías y Arquitecturas, Ingeniería Mecánica
Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
57-7-5685303 ext 164
E-mail: cristt996@gmail.com, eflorez@unipamplona.edu.co
jcserrano@unipamplona.edu.co

Resumen: Actualmente la energía eólica ha tenido gran auge dentro de las energías renovables; las turbinas que se emplean y sus álabes han sido modificadas para aumentar la eficiencia a la hora de extraer energía del viento. En este documento, se realiza el diseño de un álabe para un aerogenerador de baja potencia y baja velocidad, implementando distintos perfiles aerodinámicos. Estos perfiles fueron escogidos según su rendimiento aerodinámico el cual fue determinado por medio del software XFOIL. Basado en la teoría de momentum de elemento de alabe BEM por sus siglas en inglés, se realiza un rediseño continuo hasta que fuese capaz de extraer la máxima cantidad de energía a partir de la maximización de la relación sustentación/arrastre. Prestando atención a los problemas de desprendimiento de la capa límite y retardando la separación, que se presentan en los aerogeneradores expuestos a bajas velocidades de viento. Los perfiles aerodinámicos que fueron seleccionados para el diseño son: WORTMANN FX60-126 empleado en la raíz, el perfil SG6043 para la sección media por su gran comportamiento en el rango de número de Reynolds de diseño. Y finalmente el perfil SG6042 para la punta donde se encuentran los menores números de Reynolds. El diseño tuvo en cuenta valores de Reynolds entre 59000 y 32000. Obteniendo analíticamente 96,82W con un diámetro de 1,5m.

Palabras clave: energía, eólica, álabe, perfil, aerodinámica, sustentación, arrastre.

Abstract: Currently, wind energy has taken great increase in renewable energies; the turbines that are used and their blades have been modified to increase the efficiency when extracting energy from the wind. In this paper, the design of a blade for a low power and low wind turbine is made, implementing different airfoils. These airfoils were chosen according to their aerodynamic performance which was determined in the XFOIL software. Based on the BEM blade element momentum theory, a continuous redesign is made until it is able to extract the maximum energy from the lift/drag rate bigger. Paying attention to the problems of limit layer separation and retarding separation, which occur in wind turbines exposed to low wind speeds. The airfoils that were selected for the design are: WORTMANN FX60-126 used in the root, SG6043 airfoil for the middle section for its great performance in the Reynolds number range of design and finally the SG6042 airfoil for the tip where the lowest Reynolds numbers are found. This design considered Reynolds

values between 59,000 and 32,000. Obtaining analytically 96,82W with a 1,5m diameter.

Keywords: energy, wind, blade, profile, aerodynamics, lift, drag.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha generado una creciente preocupación y toma de conciencia del medio ambiente y consumo energético, la causa, el alza del precio del petróleo en los años setenta, junto con el mal aprovechamiento de los recursos naturales y el agotamiento de los recursos que no son renovables. La situación deriva en un mayor aprovechamiento del recurso eólico, impulsado por su bajo impacto en el medio ambiente, su imagen industrial ha cambiado, ahora es visto como una opción importante en el mercado energético. (Moragues & Rapallini, 2003). Hoy en día la energía eólica es la de mejor relación costo beneficio, hablando de energías renovables. La necesidad de energías alternativas otorga un empuje a la utilización de tecnologías de energía renovables como esta. (Jamieson, 2018).

La extracción de la energía proveniente del viento tiene un futuro prometedor, la energía eólica será una de las principales fuentes de energía eléctrica. En Europa se espera que para el año 2050 entre un 31 y un 48 % de la energía producida, sea de origen eólico. A pesar de que la creación de centrales de grandes potencias ha disminuido por las crisis financieras que se han visto, el interés en la energía eólica no se ha perdido, en especial el interés sobre las micro turbinas. Turbinas de pequeño tamaño que pueden ser usadas de manera urbana y generar energía de escala doméstica. Se hace interesante el comportamiento de estas turbinas con la variabilidad que tiene el viento en los terrenos urbanos. (Scappatici, y otros, 2016).

A pesar de lo dicho anteriormente hablando del contexto nacional, Colombia es un país que en su historia ha dependido por mucho tiempo de la energía proveniente de fuentes fósiles. Con un consumo de estas, del 78% contra un 22% de energía renovable. Pero la crisis petrolera y reducción de otras fuentes fósiles alarma al mundo y a Colombia, un país fuerte en recursos como el petróleo, gas y carbón con problemas para suministrar energía a todo el país por el aislamiento topográfico y la variación climática haciendo importante las fuentes no convencionales para la generación de energía, donde la incertidumbre de precios en el combustible y la propia sostenibilidad de los recursos hacen presión para la implementación de lo no convencional. (Soto Gutierrez, 2016).

Pero la potencia contenida en el viento no es igual a la captada por un aerogenerador, el alemán Albert Betz en 1920 calculó la máxima eficiencia que puede tener una turbina eólica. Ese valor es 16/27 (0,593). Desde entonces es conocido como el límite de Betz. Límite que fue deducido también por el británico Lanchester cerca de la misma época y el científico ruso Joukowsky y hasta el día de hoy es un límite que no es posible superar con una turbina eólica. (Jiang, Li, & Cheng, 2015).

La generación de energía eléctrica a partir de la velocidad del viento, básicamente requiere un rotor conectado a un generador eléctrico. Por su trabajo, el diseño aerodinámico del rotor cumple un papel muy importante para la maximización del aprovechamiento de la energía cinética. Compuesto por el cubo y los álabes, estas últimas son consideradas partes de la mayor importancia para el aerogenerador. (Mulugeta & Gerawork, 2017). La eficiencia de una turbina eólica depende del diseño de varios elementos del álabe: la forma del perfil aerodinámico, el tamaño de la cuerda, el ángulo de ataque o de giro del perfil o la velocidad de giro. Son elementos que deben ser diseñados tomando en cuenta las condiciones de viento. Hay que prestar atención en especial al diseño del perfil aerodinámico y el ángulo de ataque, críticos para la capacidad de producir potencia por parte del rotor. La relación entre la sustentación y arrastre para cada perfil, tiene su propio ángulo de ataque optimo donde encuentra su mejor rendimiento. (Carlin, Laxson, & Muljadi, 2003).

El funcionamiento de las turbinas en pequeño tamaño y en zonas urbanas, presenta obstáculos como los problemas aerodinámicos del bajo número de Reynolds, considerado bajo por debajo de 500.000. El número de Reynolds se relaciona de manera directa con el pequeño tamaño de los álabes, y la baja velocidad del viento en el que funcionan

estas micro-turbinas. Los problemas que se pueden presentar son: la separación de la capa laminar y el aumento del arrastre en los álabes por la creación de una burbuja de separación, eventos que disminuyen la eficiencia. (Singh, Ahmed, Zullah, & Lee, 2012). Para el diseño se recaba información sobre perfiles aerodinámicos con funcionamiento para bajos valores del número de Reynolds y se usan softwares que hagan posible la evaluación del comportamiento de los distintos perfiles. Un ejemplo de herramientas como esta es el software XFOIL con un buen funcionamiento y versatilidad a bajos valores del número de Reynolds y su versatilidad al predecir distribuciones de presión y coeficientes de sustentación en el perfil. (Drela, 1989) Con la suficiente información se puede aplicar teorías de diseño, como es la teoría BEM (*blade element momentum theory*, por sus siglas en inglés) se basa en la teoría de cantidad de movimiento referida al análisis de un volumen de control, y la cantidad de energía que se puede obtener de él, combinándola con la teoría de elemento de álabe que analiza las fuerzas en una sección del aspa en función de su geometría. (Manwell, Mcgowan, & Rogers, 2009). Para lo que se espera, resulte en un diseño con buen rendimiento en la extracción de energía o lo que es lo mismo un valor alto para el coeficiente de potencia. La utilización de teoría BEM como método de diseño para mejorar el rendimiento de las turbinas de pequeño tamaño es una estrategia que se hace cada vez más común. La optimización del rotor es económicamente más razonable comparado con la implementación de aspas que varíen su ángulo de manera mecánica, ya que el control de la dirección tendría un costo muy alto en comparación del incremento de energía extraída. (Scappatici, y otros, 2016).

2. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

Se tienen en cuenta algunos datos preliminares antes del diseño como el tamaño del aerogenerador, la velocidad del viento para la que sería diseñado y el número de perfiles aerodinámicos que serían utilizados en su diseño como un objetivo de estudio de su comportamiento.

El desarrollo comienza con la recopilación de la información pertinente tanto sobre el método de diseño como sobre los perfiles aerodinámicos que se podían usar en una turbina eólica de pequeño tamaño.

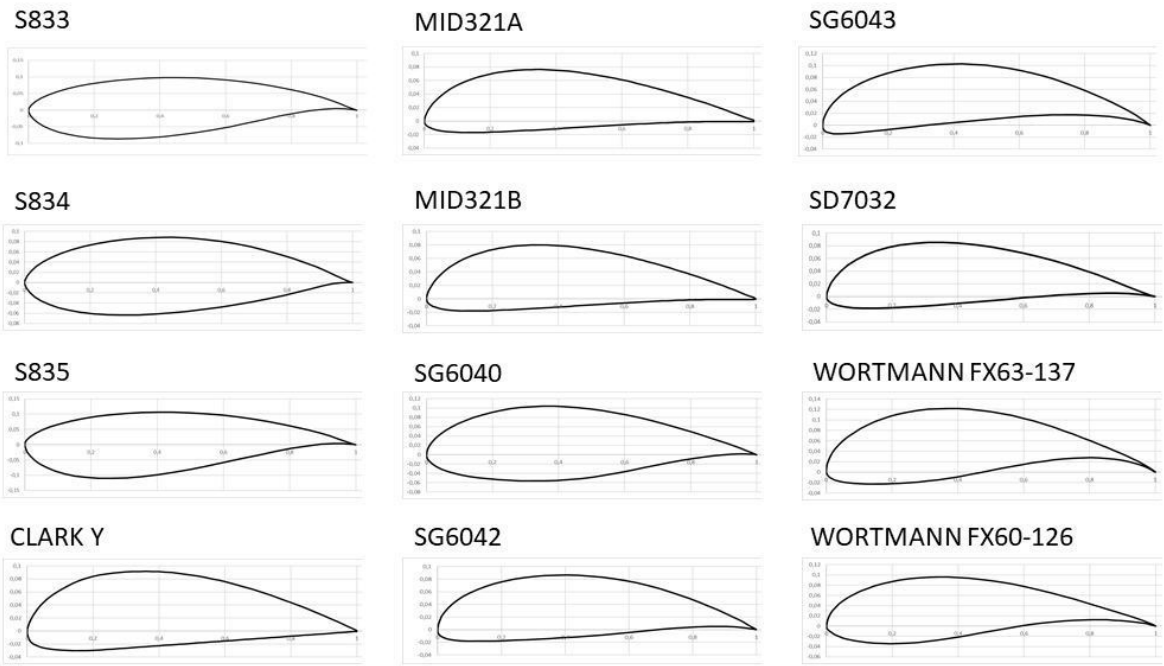


Figura 1 Perfiles aerodinámicos de la base de datos

El aspecto tenido en cuenta para la recopilación de perfiles fue el comportamiento para números de Reynolds por debajo de 500.000 y la utilización con anterioridad en estudios o trabajos relacionados con aerogeneradores de pequeño tamaño. Algunos de los perfiles están diseñados en familias y son recomendados para distintas zonas o secciones en el álabe para su mejor aprovechamiento. Es el caso de los perfiles S833, S834 y S835 diseñados cómo una familia de perfiles para aerogeneradores de eje horizontal para bajos valores de Reynolds. (Somers, 2005). También La utilización de los perfiles SG6040, SG6042 Y SG6043 es conveniente al provenir de una familia diseñada para aerogeneradores de eje horizontal con funcionamiento a baja velocidad. Con valores para el coeficiente de sustentación que pueden competir con otros perfiles incluso una relación entre sustentación y arrastre mucho mayor por debajo de 500.000 en el número de Reynolds, pero con el inconveniente de una variación difícil de documentar en el arrastre y el comportamiento para distintos ángulos de ataque. (Giguere & Selig, 1998). Estas familias se forman para disponer de un perfil con mejor rendimiento aerodinámico y estructural en las distintas secciones que tiene el álabe. un perfil con espesor más grande tendrá una menor relación de sustentación, pero presentará una oportunidad de ser usado en la base del álabe, llamada raíz, para mejorar el desempeño estructural. Pero no solo fueron seleccionadas familias también está El perfil aerodinámico SD7032 seleccionado por su utilización cómo perfil de un rotor de funcionamiento a bajos valores de Reynolds y su prueba de rendimiento. Por (Bayati, Belloli, & Bernini, 2017). Y por últimos los perfiles WORTMANN FX63- 137 usado para simulación de las hojas de un rotor de un pequeño aerogenerador usando teoría de diseño BEM y el código de Qblade. (Holst, Pechlivanoglou, Kohlrausch, & Nayeri, 2016) y Clark Y el cual es usado por (Basavaraj, 2016) junto con otros perfiles aerodinámicos para medir el comportamiento de nuevos diseños y es usado el software XFOIL para la predicción del rendimiento Incluyendo también el perfil FX60-126 como variación del FX63-127 que puede ser mejor en valores de Reynolds más bajos, se logró una base de datos vista en la Figura 1 que sería clasificada para
seleccionar los 3 perfiles que se utilizarían en el diseño aerodinámico del álabe. Para esta clasificación se evaluó el comportamiento de los perfiles aerodinámicos, mediante el uso del software XFOIL y una versión más moderna del mismo software llamado XFLR5 con el mismo código de programación base que el XFOIL, pero con un entorno de trabajo mucho más amigable con el usuario. En la Figura 3 se ve un ejemplo del comportamiento de los perfiles seleccionados.

2.1 Selección de los perfiles

En un rango para el número de Reynolds entre 50.000 y 150.000 se evaluaron parámetros como: la relación del coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre vs el ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación vs el ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación vs el arrastre, además de tener en cuenta datos geométricos como el espesor máximo de los perfiles para su ubicación dentro del diseño del álabe. La relación entre la sustentación y el arrastre es un parámetro importante en el diseño de las aspas para una turbina eólica. Para el diseño, se toma el valor máximo
de esta relación. Este parámetro de comportamiento está ligado al número de Reynolds. Entre mayor sea el número de Reynolds mayor va a ser la sustentación obtenida por el perfil, mientras que, si el valor del número decrece, aumenta el arrastre mínimo en el perfil a la vez que disminuye la sustentación máxima. (Miley, 1982).
Los perfiles seleccionados preliminar mente fueron el Wortmann FX63-137 para la zona de la raíz del álabe, el perfil SG6043 para la zona media y para la zona más a la punta el SG6042. Pero luego se decide cambiar el perfil Wortmann FX63-137 por el perfil Wortmann FX60-126 demostrando un mejor comportamiento para los valores del número de Reynolds evaluados para la sección del álabe. Figura 2.

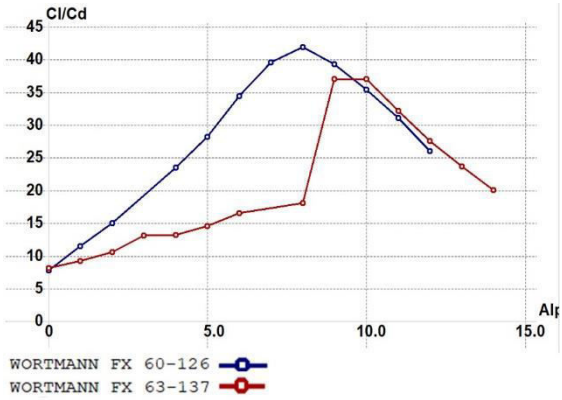


Figura 2 comparación del comportamiento entre los perfiles Wortmann FX60-126 y FX63-137.

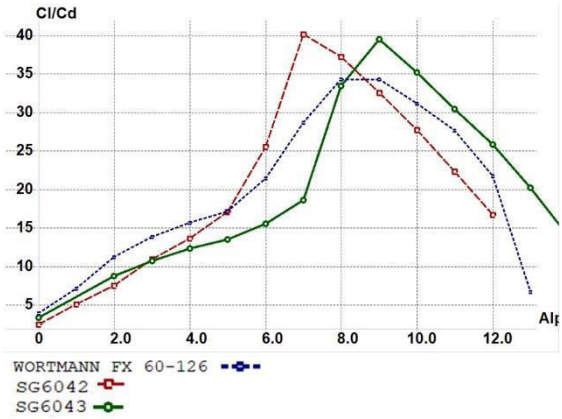


Figura 3 comportamiento de los perfiles seleccionados en diferentes ángulos de ataque C_l/C_D vs Alpha para un número de Reynolds igual a 50.000. perfiles SG6042, SG6043 y Wortmann FX60-126 en ese orden.

2.2 Calculo de la geometría del álabe

La utilización del perfil Wortmann FX60-126 para la raíz es tomada por su mayor espesor. El perfil SG6043 es elegido para la zona media por su mejor comportamiento en todo el rango del número de Reynolds elegido. Y por último el perfil SG6042 es elegido para la punta por su buen comportamiento en los números de Reynolds más bajos y menor curvatura de perfil comparada con los otros seleccionados. Habiendo seleccionado los perfiles más adecuados, se procede a calcular la geometría con la que contarán a lo largo del álabe. es importante aclarar que el diseño hecho en este trabajo no tiene grandes análisis de su resistencia física ni de sus materiales en caso de una posible construcción. Este trabajo solo se basa en el diseño aerodinámico y deja aparte toda recomendación estructural o de fabricación. La única medida tomada en cuenta como se dijo anteriormente, es la distribución de los perfiles con el máximo espesor hacia la zona más cercana a la raíz del aspa.

Para el cálculo de la geometría se utilizó la teoría BEM y así obtener el tamaño de la cuerda (c) que puede ser descrita como porcentaje del radio (R) del álabe, en este diseño ese radio R es igual a 1,5 m.

Para facilitar el diseño y la comprensión se dividió el álabe en 12 secciones que van en orden desde el centro de giro del rotor, hasta la sección 12 la última sección más alejada del eje de rotación, en cada uno de estos puntos del álabe fue calculado el valor para la cuerda, esto es mostrado en la Figura 4 también el ángulo de giro fue calculado en estas 12 secciones y su valor es descrito en grados para cada punto en la Figura 5.

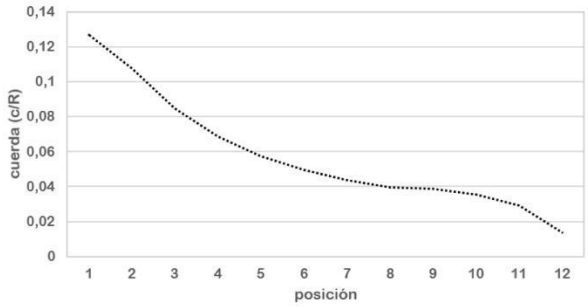


Figura 4 cuerda del álabe

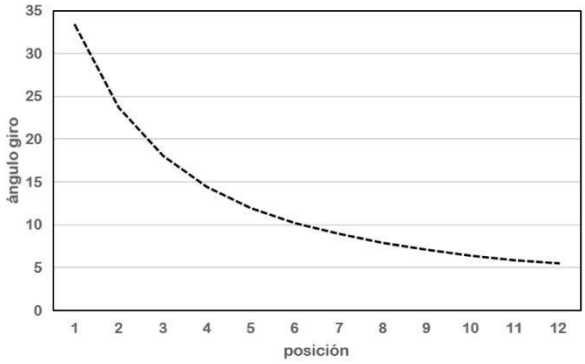


Figura 5 ángulo de giro del álabe

Luego de obtener los datos se lleva a cabo un análisis analítico mediante la misma teoría expresada por Manwell de la teoría de BEM, para el cálculo del coeficiente de potencia del diseño del álabe. Como resultado se obtiene un coeficiente de potencia analítico igual a Cp=0,4141. Considerando el área de trabajo para el álabe resulta en la extracción de

96,82W aproximado, que al compararse con la máxima extracción posible usando el límite de Betz igual a 138,55W. Corresponde a un 71,3% del límite teórico de Betz y corresponde con otros trabajos como el de (Chirinos Garcia, Moreno Figueredo, & Morales Salas, 2016) donde el coeficiente de potencia conseguido con el modelo matemático ronda el 37%.

2.3 CAD y simulación

Con las medidas calculadas mediante el método BEM se realiza el CAD del álabe, con el fin de poder realizar una simulación y comparar aspectos que relacionen el comportamiento analítico con un modelo más acercado a la realidad como una simulación CFD.

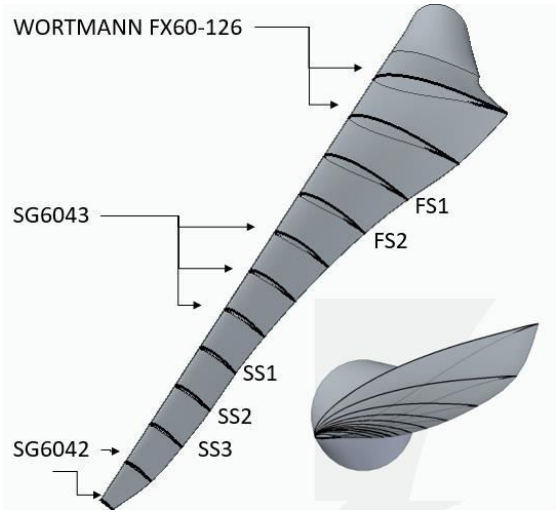


Figura 6 CAD álabe, posición de los perfiles en las secciones.

El parámetro que se utilizó para la comparación fue el coeficiente de presión de perfil para el valor del número de Reynolds que analíticamente interactuaba en cada sección del álabe. La comparación se realizó entre la gráfica obtenida en el software XFLR5 en cada sección y la obtenida en el software ANSYS. A continuación, se comparan las gráficas obtenidas mediante XFLR5 y ANSYS para la distribución del coeficiente de presión. La primera comparación se realiza a una distancia de 0,09m. en estas graficas el tamaño de la cuerda es tomada como una unidad. Así la cuerda es un valor adimensional que en el eje X al alcanzar el valor de 1 y significa la totalidad de la cuerda en la sección evaluada.

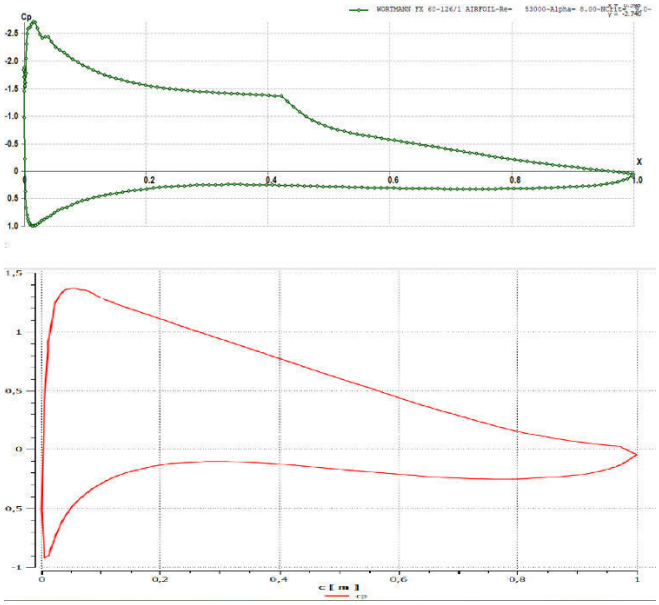


Figura 7 Coeficiente de presión en el perfil de una sección del álabe que se encuentra a 0,9m en dirección radial del eje de rotación usando XFLR5(grafica verde) y ANSYS (grafica roja)

Se observa gran similitud entre las gráficas en la Figura 7 donde se aprecian, área y valores similares entre ambas herramientas computacionales, aunque para el valor de succión máxima en el extradós el valor obtenido con ANSYS es bastante menor, en el software XFLR5 se ve una caída de succión en el centro del perfil que no es visto en la gráfica del coeficiente de presión en ANSYS. A esta misma distancia radial analizando el campo de velocidades como es mostrado en la Figura 8 se puede ver lo que sería una transición entre un flujo con alta velocidad hacia una disminución de esta velocidad en la sección media, la misma zona donde la energía cinética del flujo turbulento de la Figura 9 aumenta hasta llegar a su máximo. Esta zona mencionada coincide con la distancia a la cual hay un cambio en el *Cp* del extradós en la Figura 7. Adicional, en la Figura 8 se puede ver el punto de "remanso", el punto donde la presión es máxima en el intradós y la velocidad del fluido es mínima. (Colosqui, Delnero, Marañón Di Leo, Colman, & Boldes).

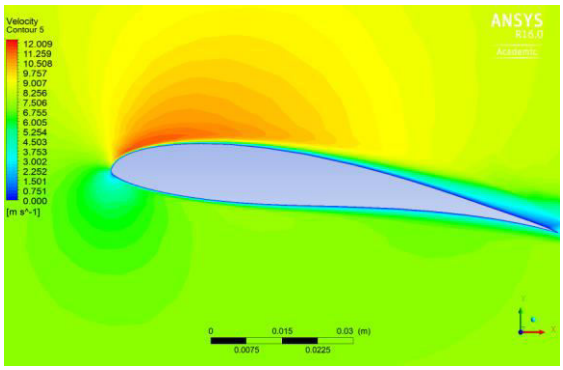


Figura 8 Campo de velocidades para el perfil del álabe

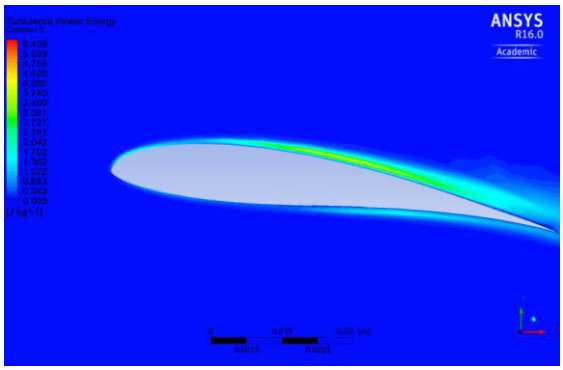


Figura 9 Campo de energía cinética en el flujo turbulento para el perfil del álabe

En la zona media del álabe se observa un mejor comportamiento en la simulación con ANSYS que con el software XFLR5. se observa una gran diferencia de presiones entre el intradós y el extradós. Y ambas graficas mantienen un comportamiento similar a lo largo del álabe. Como se observa en la Figura 10.

Por otro lado, evaluando una zona alejada en sentido radial, desde el eje de rotación. a un radio de 0,69m, donde se encuentra un perfil SG6042. Se ve gran diferencia en los valores para el coeficiente de presión, los cuales son presentados en la Figura 11

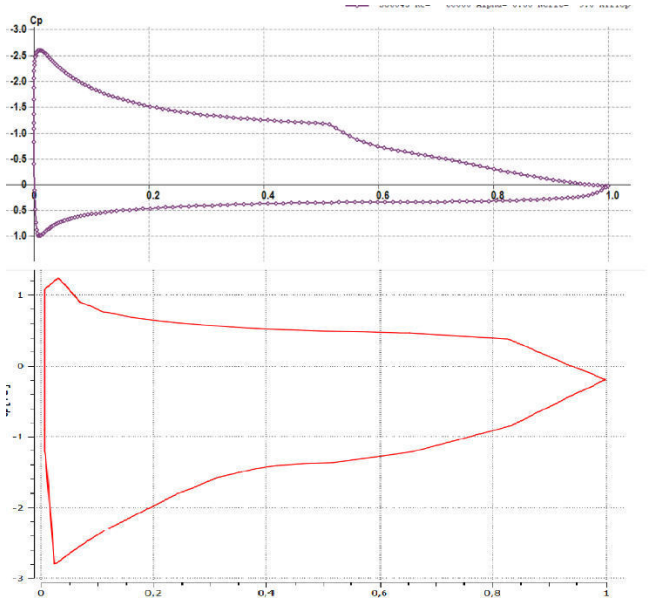


Figura 10 Grafica coeficiente de presión para un radio 0,39m en software XFLR5 (color morado) y software ANSYS (color rojo), hay que resaltar que en la gráfica de ANSYS los valores para el extradós se encuentran en la parte inferior.

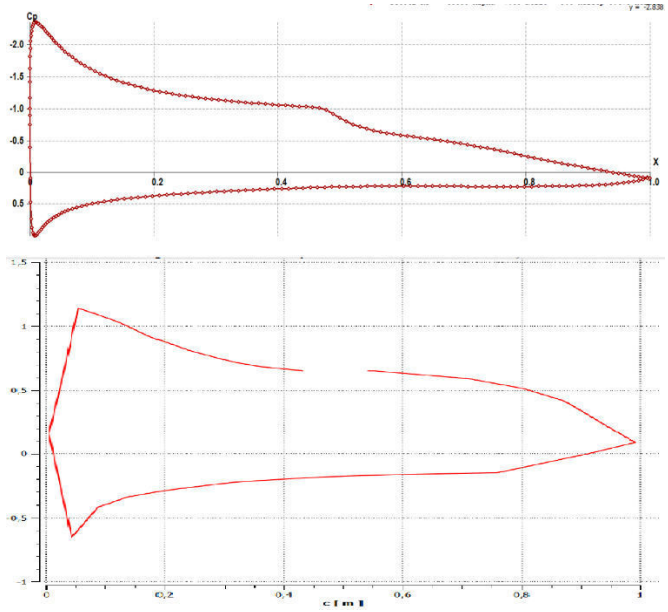


Figura 11 Grafica del coeficiente de presión a un radio de 0,69m en XFLR5 (parte superior) y ANSYS (parte inferior)

El coeficiente de presión obtenido con ANSYS se puede ver una discontinuidad en la gráfica, que puede significar un desprendimiento de la capa límite, quizá la creación de una burbuja de separación. La grafica de la energía cinética turbulenta de la Figura 13 permite pensar en esas posibilidades. Sin embargo, no es posible afirmarlo.

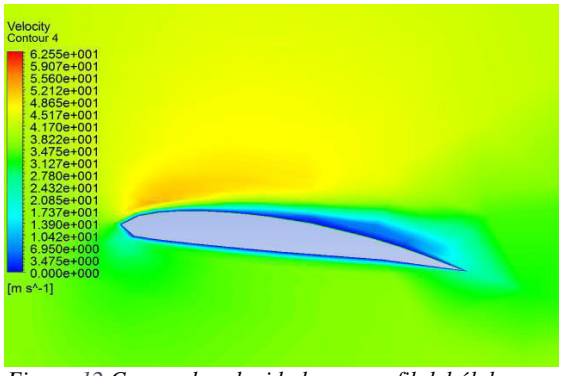


Figura 12 Campo de velocidad para perfil del álabe a un radio de 0,69m

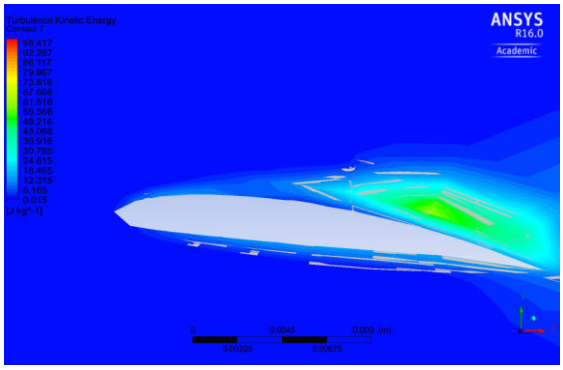


Figura 13 Campo de energía cinética turbulenta a un radio de 0,69m.

3. CONCLUSIONES

Se pudo recopilar una lista de perfiles aerodinámicos, algunos con grandes diferencias en su año de diseño y con un rendimiento aceptable para bajos valores de Reynolds. A pesar de ser unos más antiguos que otros, muchos mostraron tener un rendimiento prometedor. Gracias a este rendimiento, el uso de perfiles que no estaban dentro de la misma familia, se hace importante para los resultados finales. Aunque no se pudo utilizar algunos perfiles diseñados recientemente, por falta de información o permisos para su estudio, los perfiles usados mostraron un comportamiento de gran calidad para el trabajo, evidenciando por qué fueron objeto de estudio y constituyen una parte importante en el diseño de aerogeneradores.

La teoría utilizada para el diseño de los alabes, la teoría BEM, involucra una mezcla de variables tanto geométricas como analíticas que permiten un desarrollo en el diseño bastante completo. Permite un análisis detallado, que funciona para aspas de rotores que enfrenten vientos de baja velocidad según el objeto de este trabajo. La utilización de un álabe con diferentes perfiles muestra un prometedor rendimiento según los datos analíticos, con la capacidad de trabajar para valores muy bajos de número de Reynolds y una geometría reducida que permite utilizar menos material en caso de su fabricación, lo cual minimiza los esfuerzos sobre los álabes. Resulta interesante la capacidad desarrollada para obtener energía del recurso eólico.

Analizando el comportamiento para la capacidad de extracción de potencia del álabe, se puede ver que al aumentar la velocidad nominal λ aumenta el coeficiente de potencia, hasta acercarse a la punta donde la perdida aumenta de manera significativa. A pesar de eso el valor obtenido para el coeficiente de potencia es alto alcanzando un valor de 41,41 %

Debe ser usada una herramienta de análisis CFD con mucha más profundidad, que permita la interpretación de resultados más relevantes, para una comparación con mayor facilidad.

Probablemente el modelo realizado no tenga las mejores características estructurales, esto por haber excluido un análisis en ese aspecto. Pero el enfoque en la parte aerodinámica abre la puerta a un punto de comparación para otros trabajos.

Entre más alejada es la distancia del centro de rotación, los valores para el coeficiente de presión obtenidos con ANSYS y XFLR5 varían más. A pesar de que el cálculo de la geometría se realizara teniendo en cuenta la perdida en la punta del diseño BEM. al XFLR5 solo tener cálculos basados en el número de Reynolds no tiene en cuenta panoramas que quizá ANSYS FLUENT sí, y es quizá el porqué de la diferencia tan grande en el comportamiento para uno y el otro.

4. REFERENCIAS

Basavaraj, A. (2016). Computational Analysis of Airfoil Merging and its Effect on Performance of Lift Based Vertical Axis Wind Turbine. *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.

Bayati, I., Belloli, M., & Bernini, L. &. (2017). Aerodynamic design methodology for wind tunnel tests of wind turbine rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 217-227.

Carlin, P. W., Laxson, A. S., & Muljadi, E. (2003). The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology. *Wind Energy, Wiley Online Library*, 129-159.

Chirinos Garcia, J. J., Moreno Figueredo, C., & Morales Salas, J. (2016). Modelo matemático para el diseño aerodinámico de los álabes de una turbina eólica de eje horizontal (TEEH). *Ingeniería Energética, 37*, 63-72.

Colosqui, C., Delnero, S., Marañón Di Leo, J., Colman, J., & Boldes, U. (s.f.). CÁLCULO DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS DE PERFILES DE BAJO REYNOLDS MEDIANTE EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS.

Drela, M. (1989). XFOIL: An analysis and design system for low Reynolds number airfoils. *Low Reynolds number aerodynamics, Springer*, 1-12.

Giguere, P., & Selig, M. S. (1998). New airfoils for small horizontal axis wind turbines. *Journal of solar energy engineering, American Society of Mechanical Engineers*, 108-114.

Holst, D., Pechlivanoglou, G., Kohlrausch, C., & Nayeri, C. &. (2016). sHAWT Design: Airfoil Aerodynamics Under the Influence of Roughness. *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*.

Jamieson, P. (2018). *Innovation in wind turbine design.* John Wiley & Sons.

Jiang, H., Li, Y., & Cheng, Z. (2015). Performances of ideal wind turbine. *Renewable Energy*, 658-662.

Manwell, J., Mcgowan, J., & Rogers, A. (2009). *wind energy explained Theory, desing and aplication.* Chichester: Jhon Wiley & Sons Ltda.

Miley, S. J. (1982). A catalog of low Reynolds number airfoil data for wind turbine applications.

Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). Energía eólica. *Instituto Argentino de la Energ\ia "General Mosconi*.

Mulugeta, B. A., & Gerawork, A. (2017). Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine blades. *FME Transactions*, 647-660.

Scappatici, L., Bartolini, N., Castellani, F., Astolfi, D., Garinei, A., & Pennicchi, M. (2016). Optimizing the design of horizontal-axis small wind turbines: From the laboratory to market. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 154*, 58-68.

Singh, R., Ahmed, M., Zullah, M., & Lee, Y.-H. (2012). Design of a low Reynolds number airfoil for small

horizontal axis wind turbines. *Renewable Energy*, 66-76.

Somers, D. M. (2005). S833, S834, and S835 Airfoils: November 2001--November 2002. *National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.*, .

Soto Gutierrez, J. J. (2016). *Desarrollo de la energía eólica en Colombia.* {B.S.} thesis, Fundación Universidad de América.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN LA CARACTERIZACIÓN DE UNA TORCHA HIDRÁULICA

IMAGE PROCESSING IN VORTEX ROPE CHARACTERIZATION

Hernan Bolaños, Guillermo Angarita, Sylvain Richard, Francisco Botero

Universidad Eafit, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica
Cr 49 No 7 sur 50, Medellín, Antioquia, Colombia
Teléfono: (+57 4) 261 9500 ext. 9827
E-mail: hbolanos@eafit.edu.co, langari3@eafit.edu.co, srichard@eafit.edu.co, fboteroh@eafit.edu.co

Resumen: Turbinas Kaplan o Francis trabajando en condiciones fuera de diseño pueden exhibir fenómenos hidrodinámicos como la torcha, que representan riesgos para la instalación y operación de turbinas. En el presente estudio se reprodujo este tipo de fenómeno en una bomba centrífuga trabajando como turbina.
Para caracterizar el fenómeno, los movimientos periódicos de la torcha fueron estimados por dos métodos comparables entre sí. El primero, procesamiento de imágenes de una secuencia de fotos tomada con una cámara de alta velocidad, y el segundo, señales de sensores de presión consideradas como fluctuaciones de presión.
Análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia permitieron encontrar la relación entre espectros de la torcha y las áreas proyectadas en la secuencia de imágenes del fenómeno.

Palabras clave: Torcha hidráulica, procesamiento de imágenes, espectros, fenómenos hidrodinámicos

Abstract: Kaplan or Francis turbines working at off-design conditions can exhibit hydrodynamic phenomena such as vortex rope, which can affect the turbines installation and operation. In this study, vortex rope was reproduced in a pump as turbine. In this case, periodic movements in vortex rope were elliptical and straight on the flow sense.
To characterize the phenomenon of interest, the periodic movements of vortex rope were estimated by two methods comparing each other. First, image processing of sequence of pictures taken by a high-speed camera, and second, pressure sensors signals regarded such as pressure fluctuations.
The time and frequency domain analysis allowed to find out the relationship between vortex rope spectral components and projected areas in image sequence of vortex rope.

Keywords: Vortex rope, image processing, spectra, hydrodynamic phenomena.

1. INTRODUCCIÓN

En turbinas tipo Francis, la torcha se caracteriza típicamente por tener una forma helicoidal y por presentar dos tipos de movimientos periódicos, uno debido a la traslación y otro debido a la rotación sobre su propio eje (Nicolet *et al*, 2010). El movimiento de traslación es el que caracteriza la frecuencia de la torcha e induce fluctuaciones de presión convectivas locales en el tubo de aspiración, las cuales se propagan a todo el sistema hidráulico (Favrel *et al*, 2014). La propagación de las fluctuaciones de presión se da a la frecuencia de traslación de la torcha (Favrel *et al*, 2015). Adicionalmente, la presencia de torcha es una muestra de la disminución del nivel de presión en el cono de aspiración y por consiguiente de la aparición de cavitación (Favrel *et al*, 2015). Lo anterior, unido a que el fenómeno se presenta en condiciones de carga parcial de caudal, puede poner en riesgo la estabilidad de las turbinas.

Dado que las bombas centrífugas pueden invertir el giro de rotación del impulsor, se pueden operar como turbinas. De allí que resulte de interés replicar y caracterizar aquellos fenómenos hidrodinámicos que afectan a las turbinas, y observar de qué manera tienen su correspondencia en las bombas operadas como turbinas. Por lo anterior, se definió como objeto principal de esta investigación la caracterización de la torcha hidráulica en una bomba operada como turbina utilizando dos métodos comparables entre sí, procesamiento de imágenes y análisis de fluctuaciones de presión.

2. MÉTODOS

2.1 Banco de pruebas

El banco de pruebas está conformado por un circuito cerrado de tuberías y un banco de bombas centrifugas que suministra la cabeza hidráulica necesaria para el desarrollo de los experimentos. En el circuito está integrada la bomba centrífuga objeto de estudio que corresponde a una ITT Goulds de 1.5 HP de potencia nominal. La bomba cuenta con tuberías trasparentes para la visualización de los fenómenos hidrodinámicos en las zonas de alta y baja presión.

2.2 Instrumentación y adquisición de datos

Sensores de presión piezorresistivos Wika A10 fueron colocados alrededor de los orificios de baja y alta presión de la bomba. Sobre la voluta, y con una separación de 30°, se colocaron un sensor piezorresisitivo Futek PMP300 y un piezoeléctrico Dytran 2005V. La instrumentación fue complementada con un medidor de flujo ultrasónico GE TransPort PT878, que se instaló aguas arriba de la bomba como turbina, con un sensor de torque Futek TRS600 FSH01998, instalado en el eje de la bomba, y con tacómetro DT2234C+, que registró la velocidad de la bomba en su eje.

Las señales de todos los sensores fueron registradas por un Equipo de Adquisición de Datos (EAD) CompactRio® 9076 de National Instruments® y un software llamado Turbologger. El EAD se configuró con cuatro módulos, dos NI-9232, un NI-9215 y un NI-9203. El software Turbologger fue desarrollado en ambiente LabView® por investigadores de la Universidad Eafit.

El registro de todas las señales fue realizado simultáneamente, con una frecuencia de muestreo de 20480 Hz durante 32 s. La frecuencia máxima observable fue de 10240 Hz con una resolución de 0.03125 Hz.

2.3 Procesamiento de imágenes

Dada la configuración del experimento, el tubo de baja presión cumplió la función de tubo de aspiración de la bomba como turbina y, a través de éste, se tomaron las imágenes con una cámara de alta velocidad Photron Fastcam SA4, para un punto de operación en la zona de turbina-freno. La velocidad de captura de las imágenes fue de 3000 imágenes por segundo, con una apertura de diafragma de 1/3000 s. Para el análisis se tomó una parte de la secuencia con una duración de 1.312 s (3935 fotos, desde la imagen 2501 a la 6435). La resolución de cada imagen fue de 1024x512 pixeles.

A cada imagen se le extrajo una parte que correspondió a una zona dentro del tubo de aspiración con la torcha incluida (A_i), de 901x229 pixeles. Sobre cada imagen recortada se hizo un

proceso de filtrado para determinar el área de la torcha (A_t) dentro de la imagen. Las áreas fueron medidas en pixeles^2. La relación A_t/A_i se considera representativa del diámetro de la torcha (Nicolet *et al*, 2010).

2.4 Fluctuación de presiones

Todas las presiones registradas fueron expresadas como coeficientes de fluctuaciones de presión, de acuerdo con lo definido en la norma CEI/IEC 60193 (IEC, 1999), de la siguiente manera:

$$\tilde{P}_E = \frac{p - \bar{p}}{\rho E} \qquad (1)$$

Donde,

$\tilde{P}_E$: coeficiente de fluctuación de presión [-]

p: presión [Pa]

$\bar{p}$: presión promedia [Pa]

ρ: densidad [kg/m^3]

E: energía específica [J/kg]

2.5 Análisis de datos

Las series de relaciones de áreas de las imágenes y de presiones se analizaron en el dominio del tiempo para identificar patrones de comportamiento y en el dominio de la frecuencia para identificar componentes espectrales similares. Las frecuencias se expresaron en términos de coeficientes de frecuencia, tal como lo señala la norma CEI/IEC 60193 (IEC, 1999):

$$f_n = \frac{f}{n} \qquad (2)$$

Donde,

f_n: coeficiente de frecuencia [-]

f: frecuencia [s^{-1}]

n: frecuencia de rotación del rodete [s^{-1}]

Sobre las series de presión de los sensores instalados en la voluta se realizó un análisis de fase por el método de la correlación cruzada.

Otros números adimensionales utilizados en el presente trabajo como el factor de caudal, Q_{ED}, el factor de velocidad, n_{ED}, y el coeficiente de energía, E_{nD}, fueron definidos como lo establece la norma CEI/IEC 60193 (IEC, 1999) tal como se presenta a continuación:

$$n_{ED} = \frac{nD}{E^{0.5}} \qquad (3)$$

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 E^{0.5}} \qquad (4)$$

$$E_{nD} = \frac{E}{n^2 D^2} \qquad (5)$$

Donde,

D: Diámetro de referencia [m]

Q: Caudal [m^3/s]

3. RESULTADOS

La curva característica Q_{ED}-n_{ED} de la bomba como turbina se presenta en la figura 1. Allí se puede observar el Punto de Máxima Eficiencia (PME), el punto de embalamiento y el Punto de Operación de Interés (POI). Este punto marca el inicio de la forma "s" en la zona de turbina-freno.

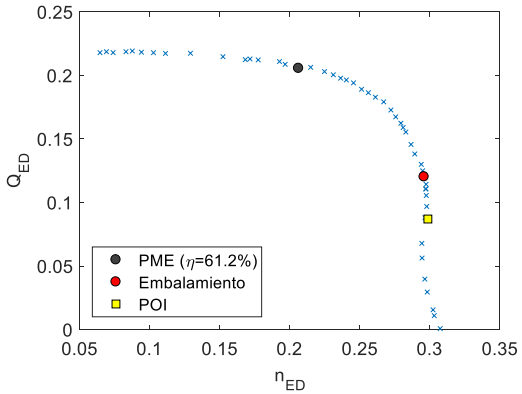


Fig 1. Curva característica Q_{ED}-n_{ED} de la bomba como turbina

Parámetros del POI se muestran en la Tabla 1. En ésta se puede observar que la relación Q_{ED_POI}/Q_{ED_PME} corresponde a un punto de baja carga parcial. En la tabla 1 también se presenta la relación de coeficientes de energía entre el POI y el PME.

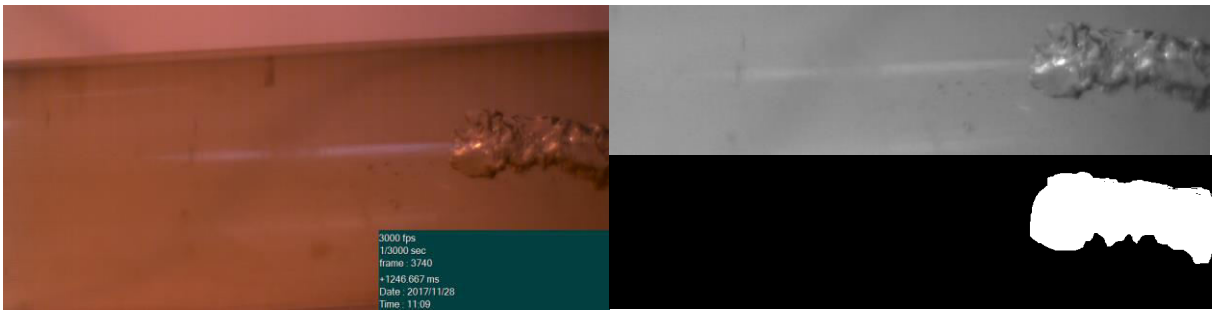
Tabla 1: Algunos parámetros del POI

n [s^{-1}]	Q_{ED}	n_{ED}	Q_{ED_POI}/Q_{ED_PME}	E_{nD_POI}/En_{D_PME}
22.44	0.0870	0.2986	0.4232	0.4773

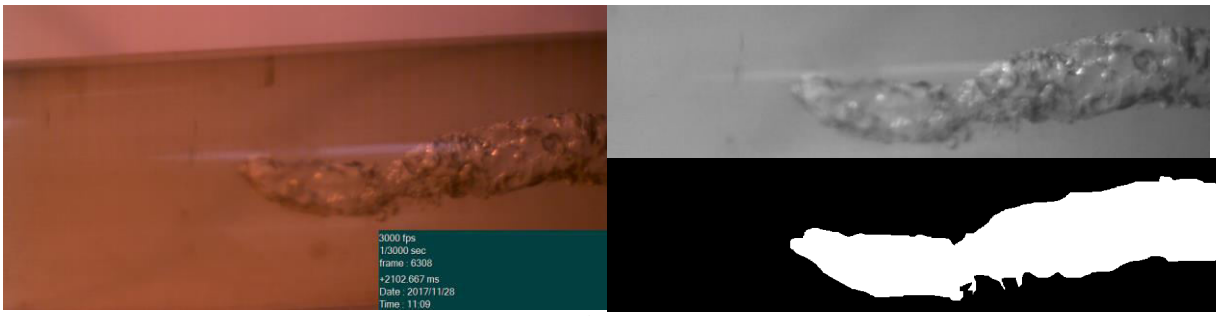
3.1 Procesamiento de imágenes

La figura 2 muestra dos imágenes a modo de ejemplo con sus correspondientes partes sustraídas y filtradas, donde el área blanca corresponde al área de la proyección de la torcha sobre un plano vertical y la parte negra corresponde a su entorno.

La secuencia de imágenes considerada puso de manifiesto dos movimientos periódicos en la torcha: uno semihelicoidal y otro longitudinal de menor frecuencia que el primero.



a)



b)

Fig. 2. Procesamiento de imágenes, a) Imagen 3740 (1241 de la secuencia considerada) y b) Imagen 6308 (3809 de la secuencia considerada)

En la figura 3 se muestra la serie de relaciones de área en el domino del tiempo. Allí se pueden ver dos patrones claramente definidos, uno, que corresponde al periodo promedio para el movimiento semihelicoidal, T_{sh}=0.0638 s, y otro, al periodo promedio para el movimiento longitudinal, T_l=0.5420 s. Con estos periodos se estimó la frecuencia del movimiento semihelicoidal, F_{sh}=15.68 Hz, y del movimiento longitudinal, F_l=1.85 Hz.

Analizando en conjunto las imágenes con la gráfica de relación de áreas (Fig. 3) se observa que el patrón del movimiento helicoidal es constante a lo largo del tiempo, en tanto que el patrón del movimiento longitudinal presenta una serie de variaciones muy particulares que se entran a detallar a continuación:

- En la secuencia de 1 a 2, la torcha se desplaza horizontalmente el equivalente a su amplitud máxima (a_l), en un periodo de tiempo aproximado a 0.09 T_l. En la secuencia de 2 a 6 se desplaza otra distancia equivalente a a_l en un tiempo aproximado de 0.91 T_l.
- En la secuencia de 2 a 3, la torcha se queda oscilando con una amplitud hasta de 0.6 a_l.
- En la secuencia de 4 a 5, la torcha se queda girando sobre su eje, pero con desplazamiento horizontal prácticamente nulo. Varía su relación de área, pero no hay movimiento horizontal significativo.

– En la secuencia de 5 a 6, la torcha oscila hasta alcanzar su máxima amplitud nuevamente.

En la figura 4 se presentan las imágenes correspondientes a los puntos 1 a 6 de la figura 3, donde el borde derecho de la imagen y la línea vertical blanca definen la amplitud máxima de la torcha en dirección horizontal. Cabe resaltar que la variación de la relación de áreas (Fig. 3) describe de una manera adecuada, entre otras cosas, el comportamiento de la amplitud de la torcha en dirección horizontal.

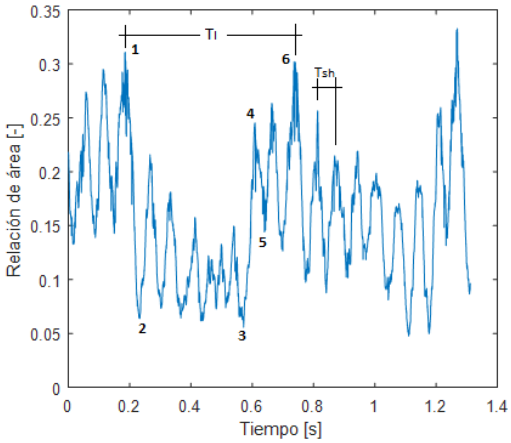


Fig 3. Serie de relaciones de área en el dominio del tiempo

3.2 Señales de presión

En la figura 5 se muestra el comportamiento de las fluctuaciones de presión de los sensores instalados en la bomba como turbina, en los puntos de operación de máxima eficiencia y de interés. En el PME no se notan perturbaciones significativas en las señales de presión de todos los sensores, en tanto que en el POI si es evidente la perturbación. La comparación entre las figuras 5a) y 5b) pone de manifiesto la propagación de las fluctuaciones de presión a todo el sistema hidráulico, tal como lo mencionan (Nicolet *et al*, 2010) y (Favrel *et al*, 2014).

El análisis de las fluctuaciones de presión en el dominio de la frecuencia se realizó por medio de la función de densidad del espectro cruzado. Esto permitió identificar tres componentes a nivel subsincrónico en el POI. Dos de ellos sugieren una relación directa con las frecuencias identificadas en el análisis de imágenes, y el otro (f_n=0.8303) sugiere como fuente un fenómeno diferente que está por fuera del alcance de este trabajo.

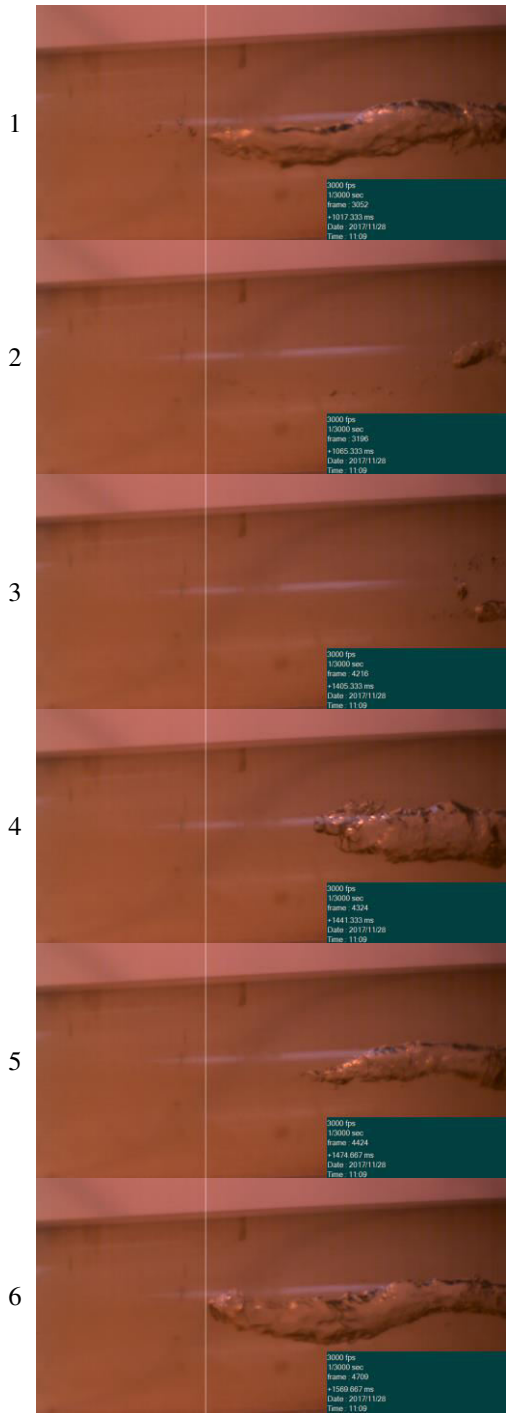
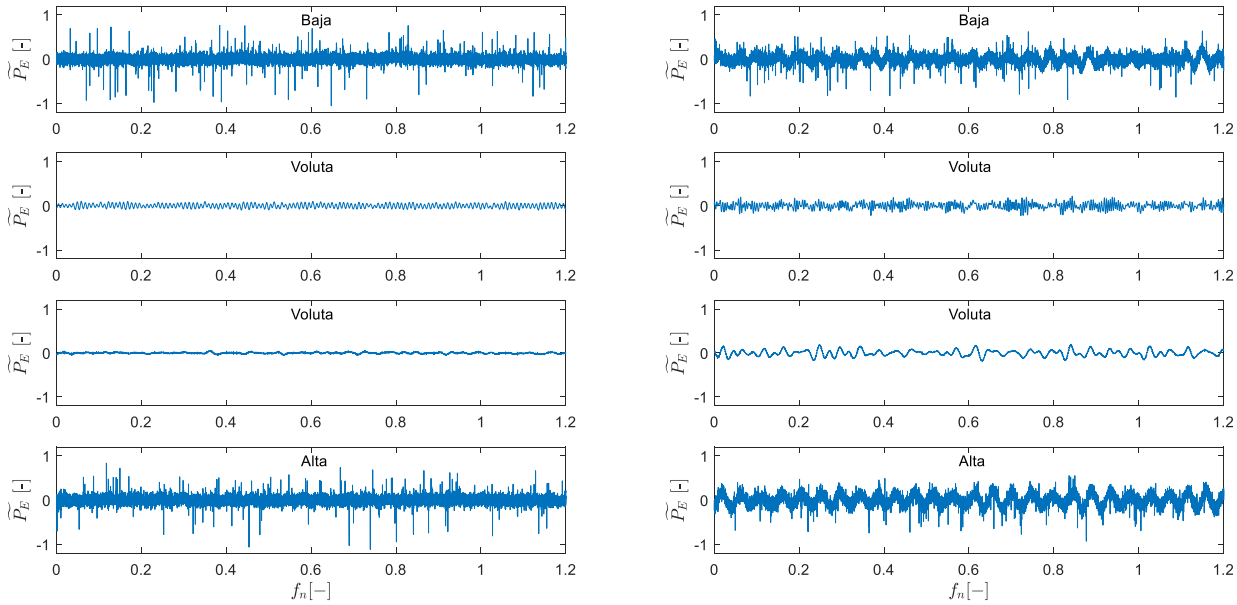


Fig 4. Torcha en un periodo promedio de 1 T_l



a) b)

Fig 5. Fluctuaciones de presiones en el PME (a) y en el POI (b)

En la figura 6a) se presenta la magnitud de la función de densidad espectral cruzada para tres casos: primero, las fluctuaciones de presión a partir del Sensor PiezoEléctrico (SPE) instalado en la voluta con las fluctuaciones de presión de la señal del Sensor PiezoRresistivo (SPR) en la voluta; segundo, las fluctuaciones de presión del SPE montado en la voluta con el SPR en la zona de alta presión, y, tercero, las fluctuaciones de presión del SPE de la voluta con las del SPR en la zona de baja presión. Esta figura presenta dos componentes espectrales (f_n=0.0561 y f_n=0.5585) que sugieren tener relación con las frecuencias de los dos movimientos de la torcha identificados mediante el análisis de imágenes. Adicionalmente, presenta otro componente espectral de interés en f_n=0.1152.

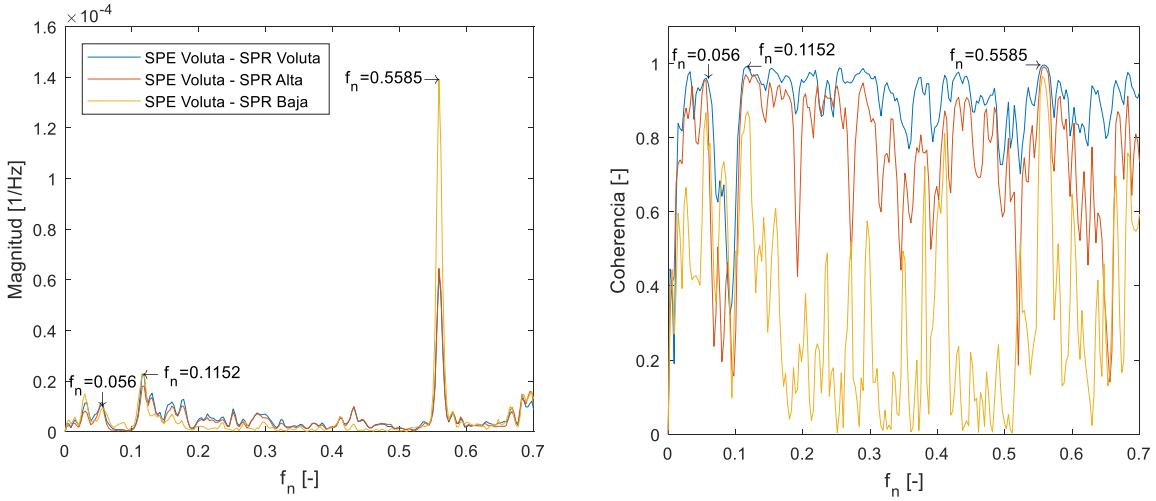
La figura 6b) indica las correspondientes coherencias para los componentes espectrales identificados en la figura 6a). Estos componentes presentan coherencias superiores al 96% para los componentes f_n=0.5585 y f_n=0.1152, y superiores al 86% para el caso del componente f_n=0.0561.

En la tabla 2 se muestra la comparación de las frecuencias halladas por los dos métodos en términos del factor de frecuencia estimado con respecto a la velocidad de rotación de la bomba como turbina. Los resultados muestran una buena aproximación en las frecuencias estimadas por los dos métodos para el caso del movimiento semihelicoidal (diferencia menor al 6%), y aceptable para el caso del movimiento longitudinal dado que se trata de unas frecuencias muy pequeñas (diferencia del 20%).

Método	F_{sh} [Hz]	fn_{sh}	F_l [Hz]	fn_l
Imágenes	15.68	0.5930	1.85 Hz	0.0698
Señales de presión	14.77	0.5585	1.48 Hz	0.0561

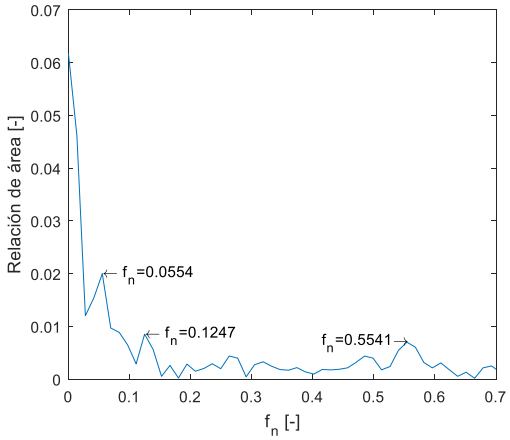
Para complementar el análisis anterior, se realizó un espectro de frecuencias para la relación de áreas (véase Figura 7). Allí se muestran tres componentes espectrales que están en el mismo orden de magnitud de los componentes espectrales identificados por medio de la función de densidad del espectro cruzado. Lo anterior sugiere que, primero, los dos métodos están identificando las

mismas frecuencias asociadas a la torcha, y, segundo, que hay un tercer movimiento periódico asociado al fenómeno hidrodinámico. El tercer movimiento podría determinar el movimiento particular que se da en sentido longitudinal y que resulta bastante interesante ya que el desplazamiento de la torcha hasta su amplitud máxima en un sentido se realiza en un tiempo mucho menor que en el otro sentido. Sin embargo, y al no tener más evidencias, no se puede comprobar esta hipótesis.



a) b)

Fig 6. a) Magnitud de la función de densidad del espectro cruzado y b) coherencia de los componentes espectrales de la misma función



4. CONCLUSIONES

A pesar de que tubo de aspiración no contó con sensores de presión, los sensores instalados en otras partes de la turbomáquina permitieron identificar el efecto del fenómeno de interés sobre el sistema hidráulico.

Si bien no se puede hacer una comparación directa entre la torcha observada en este trabajo con las que se pueden presentar en las turbinas tipo Francis, es claro que el fenómeno está gobernado principalmente, en ambos casos, por dos movimientos periódicos que se pueden notar en el procesamiento de imágenes y en el análisis se señales de presión. En el caso de este estudio, el movimiento semihelicoidal sería equivalente al giro de la torcha sobre su propio eje que mencionan (Nicolet *et al*, 2010), y el movimiento longitudinal correspondería al de traslación.

La evidencia recogida sugiere que los dos métodos son comparables, en este caso de estudio en particular, para describir los movimientos de la torcha sobre su propio eje y en sentido longitudinal, aclarando que la diferencia entre los estimativos de las frecuencias es menor para el

movimiento sobre el propio eje que para el movimiento longitudinal.

La evidencia recogida sugiere la existencia de un tercer movimiento de la torcha que se puede identificar a través de la comparación de los espectros de la serie de relación de áreas y la función de densidad del espectro cruzado de las señales de presión.

RECONOCIMIENTO

Los autores quieren expresar su gratitud a la Dirección de Investigación, el laboratorio de Hidráulica, el laboratorio de Metrología y el laboratorio de Mecatrónica de la universidad EAFIT por todo el soporte técnico y logístico brindado para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

Nicolet, C., Zobeiri, A., Maruzewski, P., Avellan, F. (2010). "*On the upper part load vortex rope in Francis turbine: experimental investigation"*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, **Vol. 12**, No. 012053. doi:10.1088/1755-1315/12/1/012053

Favrel, A., Landry, C., Muller, A., Yamamoto, K. Avellan, F. (2014). "*Hydro-acoustic resonance behavior in presence of a precessing vortex rope: observation of a lock-in phenomenon at part load Francis turbine operation"*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, **Vol. 22**, No. 032035. doi:10.1088/1755-1315/22/3/032035

Favrel, A., Landry, C., Muller, A., Yamamoto, K. Avellan, F. (2015). "*Study of the vortex-induced pressure excitation source in a Francis turbine draft tube by particle image velocimetry"*. Exp Fluids, **Vol. 56**, No. 215. doi: 10.1007/s00348-015-2085-5

International Electrotechnical Commission (1999). "*CEI/IEC 60193. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, Model acceptance tests*". Switzerland.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

MODELAMIENTO Y EVALUCION DE UNA CONTRACCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO SÚBSONICO

MODELING AND EVALUATION OF A CONTRACTION OF A SUBSONIC WIND TUNNEL

Ing. Juan Javier Mora González[*], MSc. Edison Martínez Oviedo[**], PhD. Juan Carlos Serrano Rico[**]

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica.
Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
E-mail: moragonzalezj@gmail.com.
[**] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica.
Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
E-mail: {jcserrano, edisonmartinez}@unipamplona.edu.co.

Resumen: Este trabajo presenta el modelamiento y evaluación de una contracción para un túnel de viento subsónico. Las simulaciones se realizaron a tres diferentes formas de contracción comúnmente utilizadas en túneles de viento, lo cual permitió a través de software tipo CAE analizar la uniformidad del fluido, así como el coeficiente de presión de salida a lo largo de la contracción. Estas simulaciones demuestran que la contracción propuestas por (Whitehead, Wu, & Waters, 1951) presenta un mejor desempeño en cuanto a las variables estudiadas. Con el objetivo de mejorar la uniformidad del fluido y disminuir su turbulencia en la salida de la contracción, fue utilizado un *trip* en la región de entrada de la contracción; lo cual mejoró en un 92,4% el coeficiente de presión y la intensidad de turbulencia.

Palabras clave: Contracción, capa límite, uniformidad, coeficiente de presión.

Abstract: This paper presents the modeling and evaluation of a contraction for a subsonic wind tunnel. The simulations were made to three different shapes of contraction commonly used in wind tunnels, which allowed CAE type software to analyze the uniformity of the fluid, as well as the output pressure coefficient along the contraction. These simulations show that the contraction proposed by (Whitehead et al., 1951) presents a better performance in terms of the variables studied. In order to improve the uniformity of the fluid and decrease its turbulence at the exit of the contraction, a trip was used in the region of the contraction input; which improved the pressure coefficient and turbulence intensity by 92.4%.

Keywords: Contraction, boundary layer, uniformity, pressure coefficient.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de túneles de viento constituye instrumento principal para realizar diversos análisis del comportamiento de los flujos sobre los cuerpos. En él se generan corrientes de aires el cual simulan distintas fuerzas, fenómenos aerodinámicos, entre otros. Estos experimentos dentro de los túneles de viento con condiciones controladas para ciertas condiciones como uniformidad de flujo e intensidad de turbulencia.

Hay muchos tipos de túneles de viento y se pueden clasificar por ejemplo, velocidad de flujo dividiéndolos en cuatro grupos.

Túneles de viento subsónico o de baja velocidad
Túneles de viento transónicos
Túneles de viento supersónico
Túneles de viento hipersónico

Los túneles de viento subsónico o de baja velocidad son el tipo más común y el túnel de viento el cual será proyectado la contracción es de este tipo. Los túneles de viento Transónicos son comunes en la industria aeronáutica, ya que la mayoría de los aviones comerciales operan en este régimen. Los túneles de viento supersónicos pueden usarse para investigar el comportamiento de motores jet y aviones militares. Los túneles de viento hipersónicos encuentran sus aplicaciones en cohetes y vehículos espaciales. Otra forma de categorizar los túneles de baja velocidad está dividiéndolos en túneles de viento de circuito abierto o de circuito cerrado. En los túneles de viento de circuito abierto, la potencia necesaria para utilizar el túnel de viento es alta debido a la pérdida de energía por el aire de recambio. Los túneles de viento de circuito cerrado recirculan el aire y por lo tanto necesitan menos potencia para lograr una velocidad de flujo dada (Lindgren & Johansson, 2002).

El diseño de la contracción del túnel de viento es extremadamente importante para el suministro del flujo de prueba con calidad en la sección de trabajo. La contracción es necesaria para dos propósitos principales. En primer lugar, aumentar la velocidad media del flujo de ensayo de modo que los dispositivos mejoradores de la calidad del flujo (malla, colmena) actúen en un entorno de baja velocidad en donde se reducen las pérdidas de presión. En segundo lugar, una contracción reduce las variaciones de velocidad media y fluctuante a una fracción más pequeña de la velocidad media. El diseño de una contracción requiere que el flujo permanezca unido a lo largo de la longitud de la contracción y minimice la altura de la capa límite de salida así como la no uniformidad del flujo de salida (Doolan & Morgans, 2007).

Sin embargo, para las contracciones de longitud finita existen dos regiones de gradiente de presión adversa, uno cerca de la entrada y otro en la región de salida. Como resultado, el perfil de velocidad a través del plano de salida de una contracción es no uniforme que conduce a una reducción de la longitud útil de la sección de trabajo. Además, las dos regiones de presión adversa pueden provocar una separación intermitente a gran escala de la capa límite que da lugar a una mayor inestabilidad del flujo en la sección de trabajo (Watmuff, 1986).

Sin una contracción bien diseñada, la calidad del flujo en la sección de prueba será deficiente. Los fines de la contracción son: Disminuir las perturbaciones de flujo procedentes de la cámara de sedimentación, acelerar el flujo, evitar separación de la capa límite y crear un perfil de velocidad uniforme que entra en la sección de prueba. El parámetro más importante que determina la magnitud de estos efectos es la relación de contracción, CR. El desafío en diseño de contracción es encontrar una contracción lo más pequeña posible sin separación y con una buena calidad de flujo de salida (Hjärne, Löfdahl, & Larsson, 2003).

2. METODOLOGIA

2.1 Selección de la forma de contracción

Mediante la búsqueda bibliográfica de los perfiles de contracción, se hallaron tres formas utilizadas para la construcción de los túneles de viento de baja velocidad, las cuales aportan unas características de flujo cerca de la pared y en la salida de la geometría dada. La figura 1, representa los contornos de la geometría de cada una de las contracciones seleccionada previamente. Cabe resaltar que las relaciones de contracción y la

longitud se colocaron fijas para las simulaciones elaboradas en el software de ANSYS.

Para definir o formular los criterios de diseño, una vez que se elige la relación de contracción, los criterios de diseño en el diseño de contracción del túnel de viento son: uniformidad del flujo de salida, separación, grosor de la capa límite de salida y espacio/costo. Los parámetros de diseño son la longitud, la forma de la pared y el número de Reynolds. De estos cuatro criterios, los más importantes son los dos primeros. Por lo tanto, el procedimiento de diseño propuesto aquí está dirigido principalmente a evitar la separación y producir el perfil de velocidad de salida con una no uniformidad prescrita.

La primera forma de contracción fue determinada por el polinomio de 5to orden sugerido por (Bell & Mehta, 1988):

$$Y(X) = Hi - (Hi - He)[6(X')5 - 15(X')4 + 10(X')3] \quad (1)$$

Donde *Hi* es la altura de entrada del flujo de aire de la contracción, *He* es la altura de salida de flujo y *X* es la longitud de dirección de flujo y *L* la longitud de la contracción.

La segunda forma de pared de contracción fue determinada por polinomio cubico coincidente sugerido por (Morel, 1977):

$$Y(X) = (H_1 - H_2)\left[1 - \frac{1}{X^2}\left(\frac{x}{L}\right)^3\right] + H_2 \quad \frac{x}{L} \leq X \quad (3)$$

$$Y(X) = \frac{(H_1 - H_2)}{(1-X)^2}\left(1 - \frac{x}{L}\right)^3 + H_2 \quad \frac{x}{L} > X \quad (4)$$

Los coeficientes de presión en la entrada (Cp_i) y salida (Cp_e) de la contracción se definen en las ecuaciones 5 y 6. En donde los subíndices *i* y *e* se refieren a los puntos de velocidad máxima y mínima en la pared, *U1, ∞, U2,∞* es la velocidad de corriente libre en la entrada y salida de la contracción (Morel, 1975).

$$C_{pi} = 1 - \left(\frac{u_i}{U_{1,\infty}}\right)^2 \quad (5)$$

$$C_{pe} = 1 - \left(\frac{U_{2,\infty}}{u_e}\right)^2 \quad (6)$$

La tercera forma de pared de contracción fue determinada por una función potencial sugerida por (Whitehead et al., 1951):

$$a_C - a_B = \frac{2Uk}{\pi} log \frac{[R-b][R^2+a^2]}{a[(R-b)^2+R^2]} \quad (7)$$

$$a_C - a_B = \frac{2Uk}{\pi} log \frac{[R^2-a^2][R^2+(R-b)^2]}{[R^2+a^2][R^2-(R-b)^2]} \quad (8)$$

Donde *U* es la velocidad, *k* es la relación de contracción en dos dimensiones, *R* es el radio de circulo en el plano q, *a* es la longitud *AB* y *b* es la longitud *DE*.

En la figura 1, se observan las diferentes geometrías de las contracciones objeto de estudio; las contracciones tienen la misma relación de contracción [CR] de 7 y la misma longitud, la cual es de 3,5 [m].

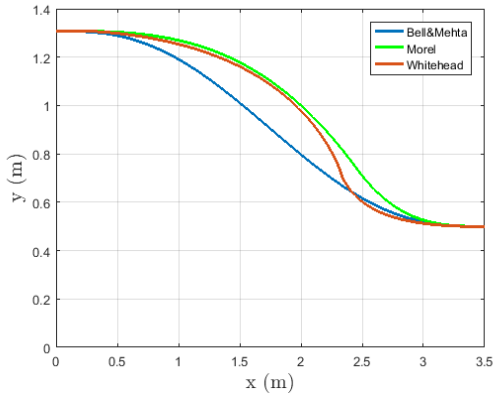


Figura 1. Perfiles de contracción de los túneles de viento. Fuente: Autor.

2.2 Criterio de calidad de diseño de la contracción

Para contrastar las diferentes formas de contornos de las contracciones utilizadas, debemos tener en cuentas las variables que afectan el flujo dentro de la geometría el cual son los factores importantes para que en la sección de prueba haya calidad en el flujo.

(Dehghan Manshadi, Mirzaei, Soltani, & Ghorbanian, 2008) Menciona que este fenómeno se origina en la entrada de la contracción porque la pared cambia repentinamente de una región plana a una curva, por lo que la línea de flujo cercana a la pared se acumularía y eventualmente aumentaría la presión relativa en la región.

El coeficiente de presión tiene un máximo y un mínimo para la distribución de presión estática a lo largo de la pared en dos lugares cerca de la entrada y la salida, respectivamente, lo que resulta en regiones de gradientes de presión adversos. La separación puede ocurrir en las regiones de gradiente de presión adversa, por lo que la contracción debe diseñarse para minimizar la posibilidad de separación (Mathew, Bahr, Carroll, Sheplak, & Cattafesta, 2006).

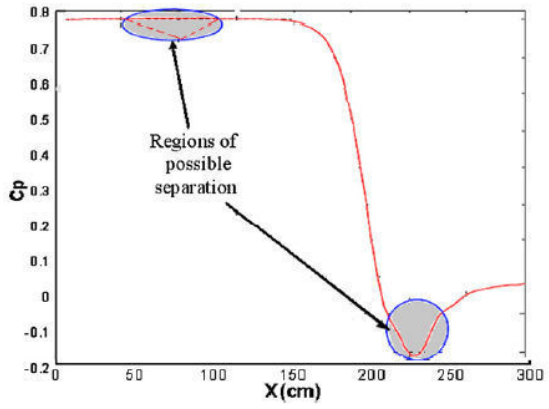


Figura 2. Ejemplo de distribución de presión en la pared en un túnel de viento. Fuente: (Ghorbanian, Soltani, & Manshadi, 2011).

Para obtener resultados medidos y calculados regulados, se utilizará un parámetro adimensional

$$C_p = \frac{P_{(x)} - P_e}{0.5 * \rho * U_e^2} \quad (9)$$

Donde,

U Componente x de la velocidad fuera de la capa límite (paralela a la superficie solida), [m/s]
ρ Densidad, [kg/m^3]
$P_{(x)}$ y $P_{(e)}$ Presión absoluta o manométrica [Pa]

La uniformidad de flujo a través de las simulaciones en el plano de salida se obtendrá campos de velocidad constantes.

(Kolmogorov, 1941) fundamenta su teoría clásica de turbulencia, de mutua semejanza y plantea que la energía cinética k de los remolinos de mayor escala fluye hacia los de menor escala a través de un mecanismo de cascada. Además, esa energía fluyente es constante entre las diferentes escalas longitudinales de los remolinos y está dada por el coeficiente de disipación ε de la energía cinética de k.

2.3 Trips en la capa límite: Metodología de optimización

Los dispositivos de transición son utilizados para perturbar el estado de capa límite alrededor o sobre un objeto de estudio. Estos los podemos encontrar dentro de un túnel viento para desarrollar investigaciones, en consecuencia se crean perturbaciones a una distancia más corta de donde probablemente se producen. Estos dispositivos son útiles, porque los espacios para la instalación de un túnel de viento pueden ser limitados.
En planeadores, estos dispositivos *(strips)* son utilizados para crear una capa limite turbulenta con el fin de postergar la separación que causaría un aumento sustancial de resistencia. Las configuraciones utilizadas comúnmente son rugosidad, alambre circular, paso superficial lo cual son formas muy simples (Slangen, 2009).

Se encontraron varios métodos para energizar la capa límite dentro de un túnel de viento pero se utilizó la forma de alambre circular por su forma sencilla de aplicación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la etapa de análisis de resultados se tiene en cuenta cada uno de los objetivos de este estudio. A continuación se lleva a cabo la forma del análisis de estudio.

3.1 Parámetros

A manera de poder obtener resultados dentro del software, las propiedades añadidas de las condiciones a la que el fluido fue empleado dentro de las simulaciones fueron las siguientes:

Tabla 1. Condiciones del aire a 20° Celsius. Fuente:(Cengel & Cimbala, 2012).

Datos de las condiciones del fluido	
Densidad	[1.204 kg/m^3]
Calor específico, C_p	[1007 J/kg*K]
Conductividad térmica, k	[0.02476 W/m*K]
Viscosidad dinámica, μ	1.825x10^{-5} [kg/m*s]
Masa molar	28.97 [kg/kmol]
Velocidad, *v(x)*	8.571 [m/s]
Velocidad, *v(y)*	0.1 [m/s]
Velocidad, *v(z)*	0.1 [m/s]
Presión, P	101.325 [kPa]
Salida de presión	0 [Pa]

La relación de contracción utilizada para para las diferentes configuraciones basado en el anterior parámetro fue de 7, lo cual permite desarrollarla en un espacio limitado la construcción del túnel viento. La velocidad requerida a la salida de la contracción es de 60 m/s.

Para los parámetros del mallado ANSYS lo genera de forma uniforme en el ensamblado de estudio, el mallado utilizado ha sido el extra fino (Leifsson & Koziel, 2015) donde las contracciones son de secciones cuadradas y el número de elementos alcanzados para la simulación está en 2.503.000 (sección de salida de la contracción: 1 [m^2] y la sección de entrada de la contracción: 6.8434 [m^2]).

Para los criterios de convergencia se toma lo que se obtenga al haber ocurrido en programa de solución que es un objetivo residual en seis órdenes de magnitud o el número máximo de iteraciones, que para este fueron de 1000.

La solución de las constantes de la ecuación de Navier-Stokes a través del software de dinámica computacional de fluidos (Doolan & Morgans) CFX, está en confluencia con la estructura del mallado y modelo de turbulencia *Shear Stress Transport (SST)*..

A través de la búsqueda bibliográfica observando el modelo más adecuado para implementar dentro del desarrollo de la simulación, ((Leifsson & Koziel, 2015) supone que el flujo es de estado estable, incompresible y turbulento. La descripción del fluido es aire y sus cualidades son tomadas de tablas. El modelo más adecuado es el *(SST)* de (Menter et al., 2003), este modelo de turbulencia seleccionado fue por la irregularidad de la forma de la contracción y para problemas aerodinámicos donde se involucren capa límite bajo gradientes de presión adversa y separación.

3.2 Resultados numéricos

En esta fase de análisis de resultados tomamos en cuenta cada uno de los objetivos planteados anteriormente. A continuación presentamos la forma de análisis:

3.2.1 Uniformidad de flujo

Se investigaron tres formas de pared para contracciones de túneles de viento, se estudió la uniformidad de flujo y coeficiente de presión. Debido a la relación de contracción que fue aplicado a cada uno de los perfiles, apreciamos una tendencia de velocidades que va aumentado a través de las paredes similares en la salida de la contracción. Mostrando los diferentes perfiles, consideramos una diferencia del flujo procedente de la cámara de ajuste, la velocidad en la contracción de (Whitehead, Wu, & Waters, 1951) (fig. 5) presenta una uniformidad de flujo con anterioridad en comparación con las contracciones de (Bell & Mehta, 1988) (fig. 3) y (Morel, 1977) (fig.4).

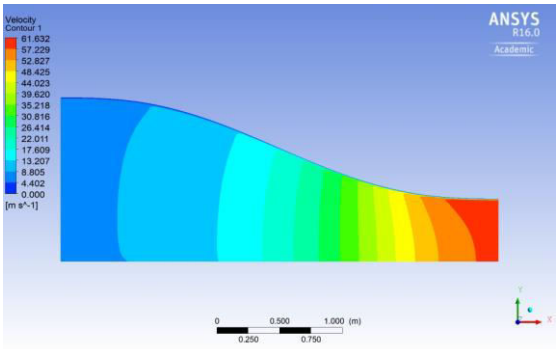


Figura 3. Velocidad en la contracción (Bell & Mehta, 1988). Velocidad de salida 60 m/s.

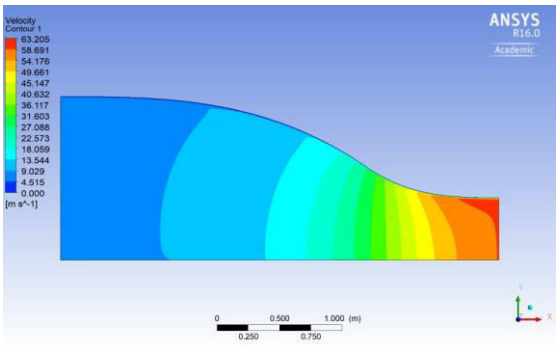


Figura 4. Velocidad en la contracción (Morel, 1977). Velocidad de salida 60 m/s.

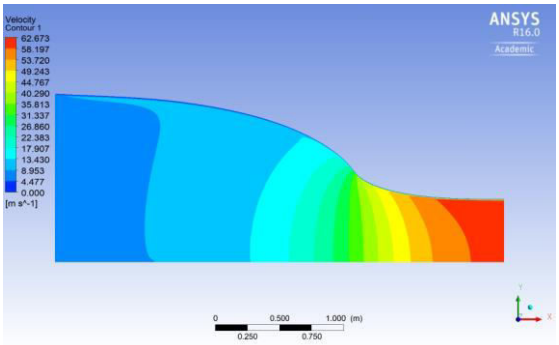


Figura 5. Velocidad en la contracción (Whitehead et al., 1951). Velocidad de salida 60 m/s.

Como el diseño de la contracción tuvo el fin de lograr la uniformidad en las corrientes libres de la velocidad y las fluctuaciones de la turbulencia, en las figs. 3-5, visualizamos que la velocidad de flujo en toda el área de salida es uniforme, donde la delgada capa límite paralela a la pared afecta de manera mínima este flujo. También se puede observar que la contracción de Whitehead presenta uniformidad de flujo muchos antes que las otras contracciones a una distancia x=3,233 [m] de la entrada de la contracción.

3.3 Coeficiente de presión longitudinal

A medida que el flujo recorre la contracción concibe un parámetro adimensional que permite a cada una de las contracciones medir en qué parte de su geometría se localiza un gradiente de presión alto, esto significa que puede haber separación de la capa límite. La siguiente gráfica se pude divisar los diferentes gradientes de presión, donde queda claro que la contracción Whitehead sigue siendo la mejor aplicación de diseño para un túnel de viento que necesite uniformidad en su flujo de salida en comparación con sus contracciones homólogas (Bell & Mehta, 1988) y (Morel, 1977).

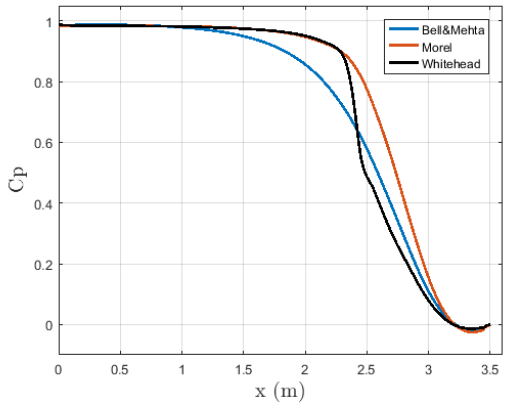


Figura 6. Comparación de los coeficientes de presión. Fuente: Autor.

3.4 Intensidad de Turbulencia

La intensidad de turbulencia generada en cada una de las formas de contracción crea vibraciones o ruido dentro del túnel de viento, en las siguientes gráficas se observó que cada una de las formas de pared en la zona donde se harán las pruebas de mediciones, el nivel de turbulencia es nulo, lo que permite la calidad de flujo en la cámara de ensayos. En las figs. 7-9 se observó los diferentes rendimientos:

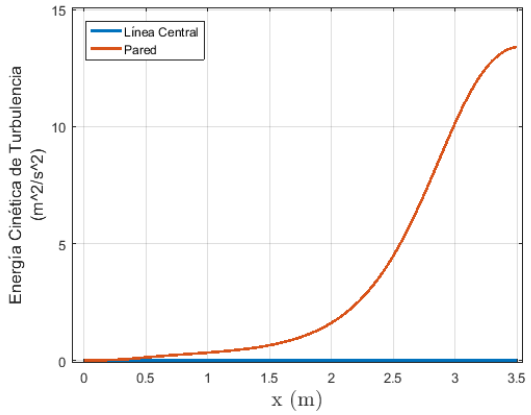


Figura 7. Intensidad de turbulencia. Contracción Bell&Mehta.

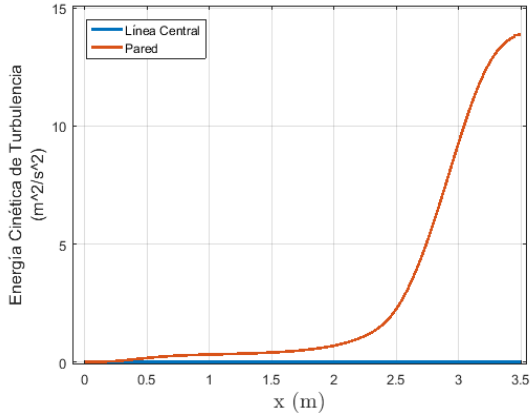


Figura 8. Intensidad de turbulencia. Contracción Morel.

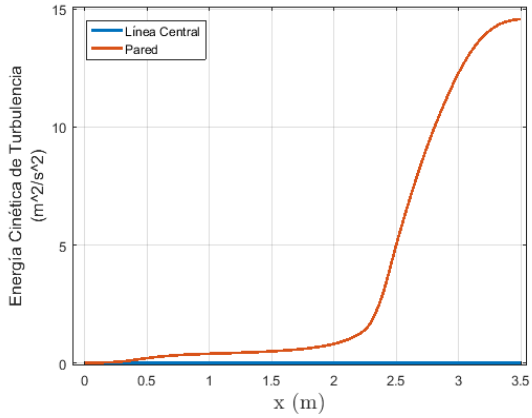


Figura 9. . Intensidad de turbulencia. Contracción Whitehead.

3.5 Optimización

Como ya se ha mencionado anteriormente, la condición esencial dentro de la contracción es disminuir el gradiente de presión adverso, logrado esto se causa grandes beneficios con respecto a la separación de la capa límite adyacente a la pared en la entrada y la salida de la contracción.

Se planteó colocar *trip strips* dentro de la contracción para modificar la capa límite y así potenciar la capa limite cerca de las paredes. Generar una capa límite turbulenta con anticipación genera un retraso en la separación del flujo. Para los ensayos realizados se escogieron tres posiciones internamente, donde se colocó la configuración circular de 2 mm de diámetro, las distancias son con respecto a la entrada de:
x=70; 90; 110 [cm].

3.5.1 Resultados numéricos de coeficiente de presión.

Como se mencionó anteriormente, la contracción elegida por sus resultados obtenidos fue la forma de pared Whitehead, ya que este aportó valores positivos en la uniformidad de flujo y un coeficiente de presión más bajo en comparación con las otras, lo que generó menos separación en la capa límite del fluido. Al añadir estos dispositivos de transición dentro de la contracción elegida, en la fig. 11 se pudo ver que la configuración colocada a 90 [cm] tuvo una disminución en el coeficiente de presión y gradiente de presión adverso, esto permite generar una capa limite turbulenta con anticipación lo que hace que la separación en el flujo se retrase. La tabla 2 y las figs. 10-12, hacen referencia de los incrementos y decrementos con respecto a los valores de la contracción que no presenta modificaciones:

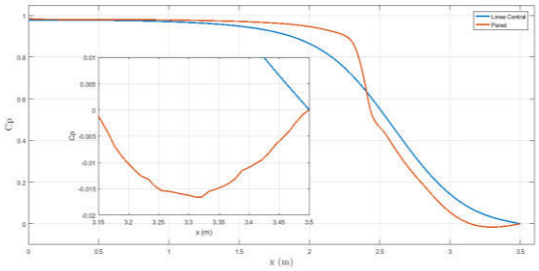


Figura 10. Coeficiente de presión. *Trip strips* 70 [cm]. Fuente: Autor.

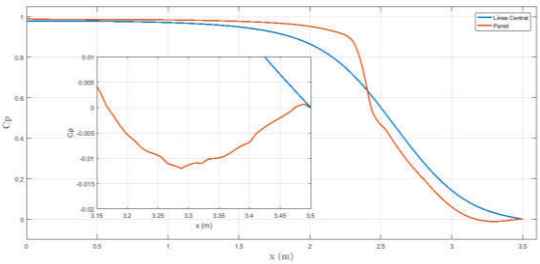


Figura 11. Coeficiente de presión. *Trip strips* 90 [cm]. Fuente: Autor.

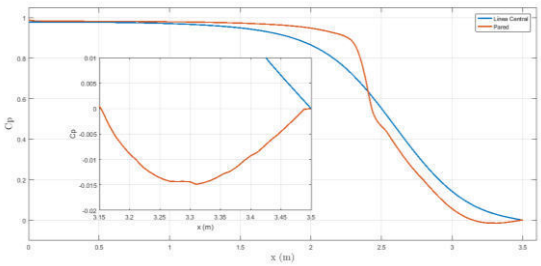


Figura 12. Coeficiente de presión. *Trip strips* 110 [cm]. Fuente: Autor.

En la tabla 2. Muestra el valor mínimo del coeficiente de presión obtenido en la región de salida de la contracción, se puede observar que cuando se ubica la trip strip a 90 [cm], la separación de la capa límite tiene el mayor coeficiente de presión en comparación a las otras estudiadas.

Tabla 2. Incremento del coeficiente de presión con respecto al modelo base.

Contracción	Coeficiente de presión
Contracción sin *trip strip*	-0,0136
Optimización 70 [cm]	-0,0166
Optimización 90 [cm]	-0,0120
Optimización 110 [cm]	-0,0149

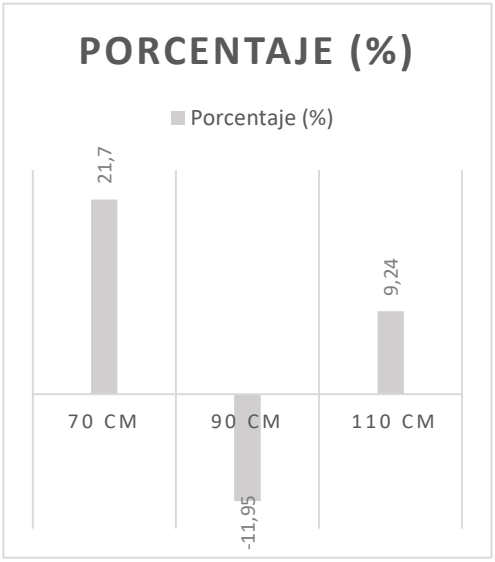


Figura 13. Comparación de porcentaje de Error entre las contracciones con respecto a la no modificada.

3.5.2 Resultados numéricos de turbulencia.

Los resultados obtenidos de intensidad de turbulencia de las optimizaciones generaron niveles más bajo con respecto a la contracción sin modificaciones interiores, lo que permite que haya menos ruidos y vibraciones en el pared de las contracciones. En la línea central donde se realizaran las pruebas dentro del túnel de viento la intensidad de turbulencia es nula lo cual no va afectar las mediciones de flujo a diferentes objetos de estudio. En las siguientes gráficas se observa la reducción con respecto a la contracción no alterada:

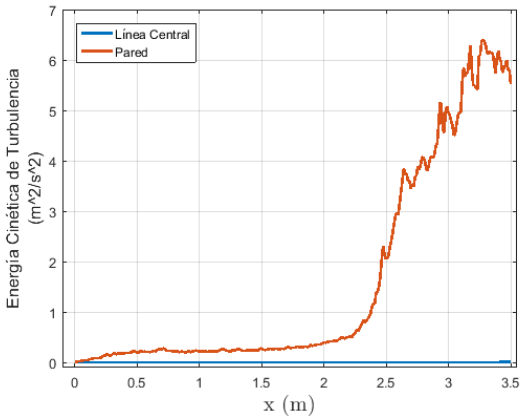


Figura 14. Intensidad de turbulencia. Contracción Whitehead optimización 1.

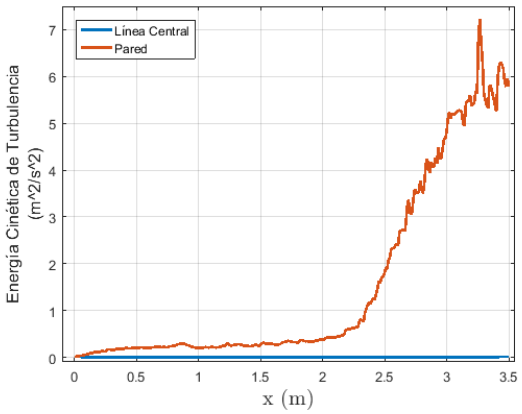


Figura 15. Intensidad de turbulencia. Contracción Whitehead optimización 2.

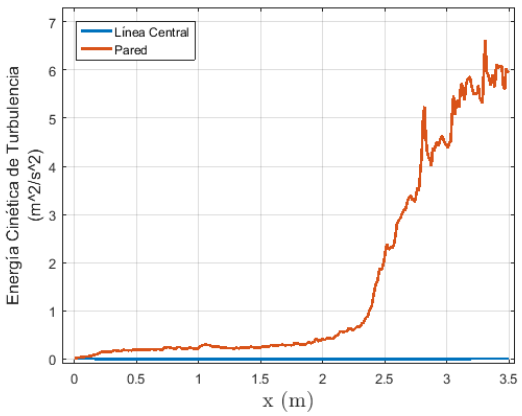


Figura 16. Intensidad de turbulencia. Contracción Whitehead optimización 3.

Tabla 3. Comparación de intensidad de turbulencia.

Contracción	Intensidad de Turbulencia en la salida [m^2/s^2]
Whitehead sin *trip strip*	14.5652
Optimización 70 [cm]	5.5283
Optimización 90 [cm]	5.7871
Optimización 110 {cm]	5.9919

4. CONCLUSIONES

Los datos numéricos de las pruebas presentadas y discutidas determinaron las características del flujo en las tres formas de pared de las contracciones a través de las caras de entrada y salida, por medio de la simulación de los parámetros de flujo se posibilitó las siguientes conclusiones:

- Los resultados muestran que la uniformidad de la velocidad se cumple en las zonas de interés para las tres formas de pared, lo que obedece unos de los criterios de calidad de diseño para una contracción de túnel de viento de baja velocidad. La función potencial obtuvo mejores resultados con respecto al polinomio de 5to orden y al polinomio cúbico coincidente, este alcanzó la uniformidad de flujo de 92,4% con respecto al plano de entrada, lo que permite una calidad de flujo dentro del túnel de viento. La función potencial de (Whitehead et al., 1951) tiene un alto rendimiento de coeficiente de presión en comparación a sus semejantes, lo que permite que haya menos índice de separación de la capa límite. El polinomio de 5to orden y el polinomio cúbico coincidente superan por 41,18% y 86,76% con respecto a esta.
- Los distintos contornos de pared obtienen resultados muy positivos en relación a la intensidad de turbulencia, lo que atribuye en las regiones de prueba del túnel de viento no se presente.

- Las *trip strips* aplicada para modificar la geometría de la función potencial obtuvieron resultados que mejoraron el coeficiente de distribución de presión y la intensidad de turbulencia en la pared. A través de las simulaciones consideramos colocar estas modificaciones dentro del túnel de viento entre 70 y 110 cm de la sección de entrada de flujo, donde los mejores resultados fueron a 90 cm permitiendo un decrecimiento del 11,95% en el coeficiente de presión comparado con la contracción sin alteraciones de geometría, permitiendo energizar la capa límite y que no se presente separación en ella.

RECONOCIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Pamplona y cuerpo de docentes por darme la oportunidad de realizar este trabajo donde se deja planteado un estudio preliminar para el diseño de un túnel viento con fines académicos. La meta es seguir profundizando sobre este tema para lograr un desarrollo en diferentes aplicaciones donde se necesite dicho estudio.

REFERENCIAS

Bell, J. H., & Mehta, R. D. (1988). Contraction design for small low-speed wind tunnels.

Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y Aplicaciones.* (S. A. d. C. V. McGraw-Hill/Interamericana editores Ed. segunda edicion ed.).

Dehghan Manshadi, M., Mirzaei, M., Soltani, M., & Ghorbanian, K. (2008). Control of pressure gradient in the contraction of a wind tunnel. *World Academy of Science, Eng. and Tech, 40*, 261-266.

Doolan, C. J., & Morgans, R. C. (2007). *Numerical evaluation and optimization of low speed wind tunnel contractions.* Paper presented at the 18th AIAA CFD Conference proceedings.

Ghorbanian, K., Soltani, M. R., & Manshadi, M. D. (2011). Experimental investigation on turbulence intensity reduction in subsonic wind tunnels. *Aerospace science and Technology, 15*(2), 137-147.

Hjärne, J., Löfdahl, L., & Larsson, J. (2003). DESIGN OF A MODERN TEST-FACILITY FOR LPT/OGV FLOWS. *ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 Inter-national Joint Power Generation Conference*, 137-145.

Kolmogorov, A. N. (1941). *The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers.* Paper presented at the Dokl. Akad. Nauk SSSR.

Leifsson, L., & Koziel, S. (2015). Simulation-driven design of low-speed wind tunnel contraction. *Journal of Computational Science, 7*, 1-12.

Lindgren, B., & Johansson, A. V. (2002). Design and evaluation of a low-speed wind-tunnel with expanding corners. *Flow Facility Design and Experimental Studies of Wall-Bounded Turbulent Shear-Flows*, 63.

Mathew, J., Bahr, C., Carroll, B., Sheplak, M., & Cattafesta, L. (2006). *Design, fabrication, and characterization of an anechoic wind tunnel facility.* University of Florida,

Menter, F. R., Kuntz, M., & Langtry, R. (2003). Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, heat and mass transfer, 4*(1), 625-632.

Morel, T. (1975). Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contractions. *Journal of Fluids Engineering, 97*(2), 225-233.

Morel, T. (1977). Design of two-dimensional wind tunnel contractions. *Journal of Fluids Engineering, 99*(2), 371-377.

Rona, A., & Soueid, H. (2010). Boundary layer trips for low Reynolds number wind tunnel tests.

Slangen, R. (2009). Experimental investigation of artificial boundary layer transition. *Master of Science Thesis, TU Delft, vol, 82*.

Watmuff, J. (1986). *Wind tunnel contraction design.* Paper presented at the Proceedings of 9th Australian Fluid Mechanics Conference.

Whitehead, L., Wu, L., & Waters, M. (1951). Contracting ducts of finite length. *The Aeronautical Quarterly, 2*(4), 254-271.

EXPERIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO, SEDE TUNJA, EN EL APROVECHAMIENTO DE LAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

EXPERIENCIES OF THE ANTONIO NARIÑO UNIVERSITY, TUNJA CAMPUS ON USE THE RENEWABLE ENERGY SOURCES

PhD. Carlos R. Batista-Rodríguez [*], PhD. Rosa I. Urquiza-Salgado [**]

[*] **Universidad Antonio Nariño, Tunja**, Facultad FIMEB, Grupo de investigación REM.
Cra 7 No. 21-84, Tunja, Boyacá, Colombia.
Cell: (57)3162985076, carlos.batista@uan.edu.co.
[**] **Universidad de Holguín**, Facultad de Informática y Matemática.
Ave XX Aniversario s/n, Holguín, Holguín, Cuba.
Cell: (53)53561284, rurquiza@uho.edu.cu.

Resumen: Las zonas no electrificadas son una realidad presente en países en vías de desarrollo, siendo la causa fundamental los altos costos de inversión. Esta situación se manifiesta en algunos municipios del departamento de Boyacá, por lo que en la sede Tunja de la Universidad Antonio Nariño se desarrollan investigaciones relacionadas con el desarrollo de tecnologías que aprovechen la energía solar y eólica para ser utilizadas en zonas no interconectadas. En el trabajo se presentan las experiencias utilizando materiales locales y reciclables, con precios competitivos en el mercado. Los resultados obtenidos son: solicitud de patente de un calefactor solar, un seguidor solar hidráulico mecánico y una máquina manufacturadora de conductos; se han construido turbinas verticales y horizontales a nivel de prototipo y un disco solar concentrador. Todos esos logros, basados en estudios realizados desde el año 2015, han sido materializados por los estudiantes en sus trabajos de grado.

Palabras clave: Energía eólica, energía solar, desarrollo de tecnologías, Tunja.

Abstract: The existence of zones without electric energy is a reality nowadays at developing countries. The fundamental cause is given by high historical costs. The situation at some municipalities of Boyacá's department is similar, for that reason the investigations of the Antonio Nariño University, specifically at Tunja campus are related with the use of solar and aeolian energy, to be utilized at non-interconnected zones. At the paper are presented the experiences in the development of technologies using the renewable energy sources and recycled materials, with competitive pricing on the market. Obtained results are: a solar heater, a solar hydraulic mechanical tracker and a machine of conduits are on patents process; also have been built a vertical and an horizontal wind turbine as prototypes; and a solar disk concentrator. All those achievements, based in studies accomplished since 2015, have been materialized by students through their grade projects.

Keywords: Eolic energy, Solar energy, development of technologies, Tunja.

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía renovables (FER) han estado presentes en la vida humana desde la aparición del hombre. En la era primitiva y hasta el desarrollo de la Revolución Industrial del siglo XVII fueron aprovechadas por el hombre para su alimentación; la protección ante el frío (quema de madera); en su trabajo (molinos de viento); en su transportación (embarcaciones a vela). Con el descubrimiento del carbón mineral, el petróleo, el gas natural y el uranio, el aprovechamiento de las FER de forma extensiva se extinguió, quedando su uso en formas o producciones aisladas sin mayor importancia económica o social.

Solo con la crisis petrolera en los años 70 del pasado siglo, los estudios de contaminación ambiental y los desastres nucleares ocurridos en las últimas décadas han llevado al despertar de la necesidad de mirar hacia atrás y, con el apoyo del desarrollo de la Ciencia y la Técnica, lanzarse de nuevo a la conquista del aprovechamiento de las FER.

Sin embargo, el relativo empleo de las FER solamente se ha logrado en los países de mayor desarrollo científico-técnico, donde grandes empresas monopolizan la producción de instalaciones y maquinarias para convertir las fuentes de energía alternativas en electricidad y exportar dichas tecnologías a países en vías de desarrollo.

Por otro lado, el período de recuperación de las inversiones es prolongado, dejando al final bajos márgenes de utilidad en su operación. Todo lo anterior ha traído consigo, de forma contradictoria, que países que no disponen de recursos petroleros continúen con la operación de grandes plantas termoeléctricas, dependiendo de los precios del crudo y afrontando las inevitables consecuencias sociales, medioambientales y políticas para dichos países.

En la actualidad, el 9,1% de la energía producida mundialmente proviene de las fuentes de energía renovables. La energía solar ha recibido financiamientos récord en China y Japón, e igualmente ocurrió en Europa con el financiamiento de la energía eólica costera (Behrendt, 2015).

¿Por qué las potencialidades de las fuentes locales de energía renovable (FLER) no son aprovechadas por los países en vías de desarrollo? ¿Por qué aún existen territorios que no disponen de energía eléctrica? ¿Por qué las empresas privadas no están dispuestas a invertir en este sector? Quizás algunas de estas preguntas podrían ser respondidas analizando los pronunciamientos de autoridades e investigadores colombianos.

Según (Benavides, 2011), en Colombia no existe una oferta importante de cursos en materia de energía renovable, ni formales ni informales. Esto se debe, fundamentalmente, a la consideración generalizada en los diferentes ámbitos de que la generación de energía predominantemente hidroeléctrica satisface los requerimientos energéticos del país. El sistema formal de educación sigue egresando profesionales en ingenierías con marcados enfoques clásicos, sin profundizar en temas de manejo de vientos, sol, biomasa, etc.

En las conclusiones de (García, Corredor, Calderón, & Gómez, 2013) se plantea que en Colombia existe potencial para el desarrollo de energías renovables no convencionales; sin embargo, la estructura regulatoria actual hace que la diferencia en rentabilidad entre estas tecnologías y las convencionales se incremente, dificultando su entrada en el mercado.

Las fuentes de energía renovables (FER)

Las FER son aquellas fuentes de energía que existen por lo menos en alguna región del planeta y cuyo uso no altera el equilibrio térmico del mismo, que no genera residuos irrecuperables y cuya velocidad de consumo no sea superior a la velocidad de regeneración de la fuente energética

(Carta, 2009). Entre ellas se tienen: biomasa, eólica, hidráulica, solar, geotérmica y marina.

Las fuentes locales de energía renovable (FLER)

Las FERL son aquellas fuentes de energía renovable que se pueden localizar físicamente en una localidad ubicada geográficamente en un municipio, donde existe una población o comunidad con límites geográficos bien establecidos; fuentes tales que su aprovechamiento respondería a las necesidades locales, sin requerir la creación de redes de distribución de la energía producida, con sus consecuentes pérdidas.

Las FLER se caracterizan por:

- Existencia física o geográfica: depende de la ubicación geográfica de la localidad analizada. Es decir, bajo cualquier circunstancia las fuentes de energía solar, eólica y la biomasa están presentes, pero otras como la energía hidráulica, geotérmica y marina pueden o no existir en la localidad.
- Potencial energético disponible: es el umbral mínimo de aprovechamiento de cada una de las fuentes de energía renovable que existen físicamente en la localidad, a partir de las tecnologías de aprovechamiento conocidas en la actualidad por el hombre.

Es de notar que las fuentes de energía renovable locales son por excelencia la eólica y la solar.

Energía eólica

La energía eólica es considerada muy promisoria como fuente de energía renovable. Se estima que cubrirá un 20% de la demanda de energía eléctrica global para el año 2020, siendo una inagotable y renovable fuente de energía disponible en cualquier parte del planeta (Dumitrescu, Mălăel, Drăgan, & Gherman, 2015).

El viento es el aire en movimiento, se caracteriza por su velocidad media y su dirección de procedencia (Martinez, 2015). El origen del viento está dado por el calentamiento desigual de la superficie de la Tierra por la radiación solar, de la dilatación de aire y de la fuerza gravitatoria, por lo que se generan movimientos convectivos en el aire (ascendencias y subsidencias), que a su vez dan lugar a corrientes horizontales de compensación.

El aprovechamiento del potencial eólico disponible en las localidades está dado por las características de los vientos y las características técnicas de las turbinas a instalar (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).

Energía solar

Del Sol se reciben radiaciones electromagnéticas (fotones, sin masa en reposo, que tardan 8 minutos en llegar, viajando a la velocidad de la luz) y radiaciones de partículas (protones y electrones a alta velocidad, mayor que los 618 km/s de escape del Sol, con una velocidad terminal media de 400 km/s y un flujo de unas $500 \cdot 1012$ part./($m^2 \cdot s$)) (Martinez, 2015).

Las características principales de las radiaciones electromagnéticas son:

- Potencia (la irradiancia G es la potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación).
- Distribución espectral (distribución de esa potencia en las diferentes longitudes de onda que la integran, E_λ).

La radiación incidente sobre la superficie terrestre, como resultado de los procesos de atenuación, tiene tres características generales: la escasa intensidad, dado que presenta un promedio de 1 kWh/m²; la intermitencia, que depende de la alternancia entre día y noche; la poca uniformidad, porque se concentra sobre todo entre las latitudes ± 30° (Bernardelli, 2010).

2. DESARROLLO

2.1. Necesidades y deseos de electrificación

La necesidad de llevar la energía eléctrica a zonas no electrificadas de muchas regiones del planeta es una realidad que por los medios convencionales no se podrá lograr, debido a que muchas localidades son aisladas, con densidad poblacional muy pequeña y de difícil acceso. Todo indica que solamente se podrían satisfacer dichas necesidades con el desarrollo de micro tecnologías de bajo

costo, capaces de aprovechar la energía del viento y/o del Sol.

La energía eólica y la solar se pueden convertir en energía eléctrica con el desarrollo de aerogeneradores y por medio de paneles fotovoltaicos o dispositivos concentradores, respectivamente.

Atendiendo a la necesidad de electrificar las zonas rurales en los países en vías de desarrollo, las tecnologías de electrificación rural y los suministradores de éstas deben cumplir un grupo de requisitos mínimos, para la viabilidad de su uso, como son:

1. Mayor eficiencia técnico-económica (Wh/$) que las tecnologías actuales. Significa una mejor relación entre la energía generada y los costos de fabricación, operación y mantenimiento, facilitando su comercialización.
2. Procedimientos de montaje y mantenimiento de baja complejidad, que puedan ser ejecutados por el usuario final.
3. Aprovechamiento de materiales de producción local y/o reciclable, favoreciendo la protección del medio ambiente.
4. Altos índices de fiabilidad.

2.2. Realidades para la electrificación con FLER de zonas no interconectadas

Es de notar que en las zonas no electrificadas, por sus mismas características, es frecuente la carencia tanto de información sobre datos fundamentales, como de recursos logísticos, imprescindibles para acometer variantes de electrificación a partir de las FLER. Entre tales dificultades se identifican las siguientes:

1. No se conoce el potencial real de la energía eólica y solar de cada localidad en específico.
2. Se desconoce con exactitud la demanda de energía para cada punto en particular.
3. No se dispone en el mercado de micro tecnologías con costos razonables para producir la energía eléctrica requerida por la población en dichas zonas.
4. No se dispone de infraestructura ni recursos para realizar el estudio de potencial de energía disponible, ni de la demanda.
5. Las instituciones gubernamentales y de educación superior no juegan un rol preponderante con el objetivo de propiciar el estudio y desarrollo de tecnologías que permitan cambiar la situación actual.

2.3. Acciones, experiencias y resultados en la Universidad Antonio Nariño, sede Tunja

A tenor con lo anterior, en la sede Tunja de la Universidad Antonio Nariño (UAN) desde el año 2015 se han desarrollado actividades encaminadas a fortalecer, en el ámbito investigativo y docente, un grupo de iniciativas, que pueden resumirse en.

- Establecimiento de la línea de investigación “Tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable”, para propiciar el desarrollo de trabajos de grado, así como investigaciones de maestrías y doctorados, dentro de las temáticas de protección del medio ambiente y aprovechamiento de las FLER.
- Elaboración de proyectos de investigación que promuevan el apoyo con financiamiento interno de la UAN, para el desarrollo de investigaciones en dicha dirección.
- Adquisición de la instrumentación mínima necesaria para despegar en el estudio de las potencialidades locales de que se dispone con la energía eólica y solar.
- Elaboración de proyectos de investigación que promuevan el apoyo del gobierno del territorio, así como de instituciones, empresas y organizaciones no gubernamentales, con el objetivo de buscar financiación para promover el desarrollo del aprovechamiento de las FLER.
- Creación de semilleros de investigación, tanto en las temáticas de protección del medio ambiente y evaluación de potencialidades

energéticas renovables locales, como en el estudio y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de las FLER.

- Proyección de asignaturas electivas para los diferentes programas existentes en la Institución que profundicen en la protección del medio ambiente y en el desarrollo de tecnologías que aprovechen las FLER.
- Establecimiento de contactos con otras IES del territorio para crear grupos de investigación interinstitucionales.
- Realización de visitas a gobiernos de las localidades con un alto grado de necesidades de recursos energéticos, para ofrecer posibilidades de desarrollo de investigaciones en el territorio.
- Establecimiento de temas de investigación relacionados con:
    1. Estudio del potencial eólico y solar de la localidad.
    2. Desarrollo de calefactores solares de bajo costo que sean competitivos para introducirlos en el mercado.
    3. Desarrollo de seguidores solares de bajo costo para su uso en paneles solares tradicionales.
    4. Desarrollo de discos solares para la producción de energía eléctrica.
    5. Estudio de materiales locales para su uso como materiales absorbentes de la radiación solar.
    6. Estudio de propiedades físicas y mecánicas de algunos polímeros para su uso en la fabricación de elementos de máquinas para diferentes tecnologías.
    7. Estudios de materiales para acumuladores térmicos.
    8. Estudio de la factibilidad de desarrollo de tecnologías hibridas modulares que en una misma instalación aprovechen la energía eólica y solar.

A continuación, se presentan experiencias y resultados obtenidos en los últimos tres años en la sede Tunja relacionado con el estudio y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía eólica y solar.

1. Adquisición de equipos de medición, de la energía solar y la energía eólica como son: albedómetro (ver Figura 1), anemómetros y sensor de temperatura ambiental (ver Figura 2), así como Datalogger para el registro y almacenamiento de los datos (Figura 3).



t

Fig.1. Albedómetro



Fig.2. Anemómetro



Fig.3. Datalogger

2. Adquisición de un módulo fotovoltaico, compuesto por panel solar, regulador y batería, el cual está instalado en el área

de la universidad para su estudio, ver Figura 4.

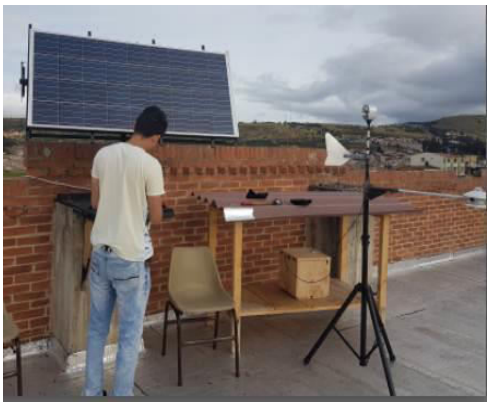


Fig. 4 Montaje de panel solar por estudiantes

3. Adquisición de un calefactor solar instalado en el área de la universidad para su estudio (Figura 5).



Fig. 5 Calefactor solar

4. Adquisición de impresora 3D, para la fabricación de diferentes elementos de máquinas de tecnologías de aprovechamiento de la energía eólica y solar a desarrollar en la sede (ver Figura 6).



Fig. 6. Impresora 3D

5. Adquisición de otros instrumentos y sensores, como sensores de temperatura PT, piranómetro infrarrojo, medidor de espesores, medidor de flujos, entre otros. Ver Figura 7.



Fig. 7. Medios de medición

A partir de la disponibilidad de los equipos y sensores se creó un área de investigación en la planta superior de las instalaciones de la universidad, donde se realizan las mediciones de las variables y su posterior procesamiento y estudio. Con los datos obtenidos se procedió a trabajar en el diseño, construcción y ensayos de diferentes tecnologías, según se describe a continuación.

1. Diseño, construcción y ensayo de un calefactor solar.

A partir de la comparación del calefactor solar con un calefactor eléctrico también adquirido se procedió a diseñar un calefactor que reuniera las mejores condiciones de ambos equipos estudiados. Se generó su diseño, a partir del mismo hasta la actualidad se han construido dos prototipos, en la actualidad se trabaja en un tercero. El prototipo de calentador solar presentado en la Figura 8 está actualmente en proceso de ser patentado, en el mes de julio de 2017 fue radicada la solicitud de patente en la Superintendencia de Industria y Comercio de la República de Colombia[CB1].



Fig. 8. Calefactor solar desarrollado

2. Diseño, construcción y ensayos de seguidores solares de bajo costo.

Teniendo en cuenta la posibilidad que brindan los seguidores solares de mejorar la eficiencia de los paneles solares, entre un 40-50% y dado que para el desarrollo de discos solares concentradores es necesario disponer de seguidores solares, se realizaron diferentes estudios sobre los seguidores solares disponibles actualmente en el mercado. Para ser utilizados en el desarrollo de micro tecnología, fueron evaluaron sus altos costos de fabricación; por lo que han sido desarrollado varios posibles modelos de seguidores de bajo costo con consumo eléctrico mínimo y que dispongan de movimiento en los planos azimutales y cenitales, como se muestra en la Figura 9. Uno de los modelos fue sometido a la Convocatoria 793 de Financiamiento de Invenciones y Patentes, lográndose financiamiento para el estudio de su posible patentabilidad.



Fig. 9. Seguidor solar desarrollado

3. Diseño, construcción y ensayo de un disco solar concentrador

La producción de energía eléctrica a partir del uso de paneles fotovoltaicos hasta la actualidad no es competitiva respecto a la producción de energía eléctrica con fuentes de energía convencionales. Realizados diferentes estudios sobre el aprovechamiento de la energía solar térmica, se hizo notar que una de las tecnologías que prometen en su desarrollo es la de los discos solares concentradores, por su modularidad y capacidad de transformar la energía solar en energía térmica de altas temperatura. Con los antecedentes anteriores se procedió al diseño y construcción de un prototipo de disco solar concentrador, que se muestra en la Figura 10. Al realizar ensayos se pudo registrar temperaturas de hasta 532°C en algunos instantes de tiempo, de forma más regular fueron alcanzadas temperaturas entre 350°C y 400°C.

4. Diseño y construcción de turbinas eólicas verticales

El uso de las turbinas eólicas es promisorio para la producción de energía eléctrica de forma masiva

interconectada a la red. Sin embargo, para la producción de energía eléctrica a partir de la energía eólica en zonas pobres no interconectadas se necesitan máquinas duraderas, eficientes y de bajo costo. Por tanto, se procedió a estudiar diferentes tipos de modelos de turbinas existentes en el mercado. Se arribó a la conclusión de que las turbinas verticales son muchos más fáciles de diseñar y construir, aunque es conocida su menor eficiencia respecto a las horizontales. Con tales elementos en consideración se han podido diseñar y construir varios modelos de turbinas verticales, en particular los modelos Savonious y turbinas híbridas a partir de los modelos Savonious y Darreious, como se muestra en la Figura 11. Los modelos, construidos a escala, están en proceso de pruebas y ensayos.



Fig. 10. Disco solar desarrollado



Fig. 11. Turbina vertical hibrida

5. Diseño, construcción y ensayos de sistemas híbridos.

A tenor con la necesidad de producir energía eléctrica a partir de la energía solar y eólica a bajos costos y teniendo en cuenta que en algunas localidades solo se dispone del potencial de unos de esos dos tipos de energía renovable, se ha pensado en el desarrollo en una instalación que disponga a la vez de paneles solar, o discos solares concentradores, y turbinas eólicas. En la actualidad se desarrolla una turbina eólica vertical con panel solar incorporado, que la convierte en un sistema híbrido, como se muestra en la Figura 12, prototipo de máquina en proceso de estudio y perfeccionamiento.



Fig. 12. Sistema hibrido en desarrollo

Los estudios realizados y el desarrollo de diferentes tecnologías han permitido profundizar en las investigaciones en el desarrollo de los trabajos de grado de los estudiantes (ver Figura 13) y consolidación de los trabajos en semilleros investigativos.

Los resultados alcanzados han sido socializados, para su conocimiento y posible generalización, de diferentes formas. Por una parte, se ha podido participar en eventos científicos, para exponer las experiencias que se van acumulando en el aprovechamiento de las fuentes de energía renovable. Por otra, también se han identificado y aprovechado oportunidades existentes, como se aprecia en la siguiente relación:

- Presentación de ponencia en el Congreso Internacional de Energía en la Ciudad de México.
- Presentación de ponencia en el II Congreso Internacional y V Nacional de Ingeniería Electromecánica de la UPTC.
- Sustentación de varios trabajos de curso por estudiantes de los programas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Electromecánica, sobre diseño, construcción y ensayos de turbinas eólicas, calentadores solares y seguidores solares.



Fig. 13. Presentación de temas para proyectos de curso.

- Firma de convenios marcos de trabajo con universidades nacionales e internacionales (España, México).
- Desarrollo de Proyecto de investigación con financiación de UAN.
- Alianza de trabajo con universidades como la UNAD, UPTC y Juan de Castellanos.
- Artículos publicados, en revistas colombianas y el extranjero.

4. CONCLUSIONES

Fueron estudiados los antecedentes del aprovechamiento de las FLER en zonas no interconectadas al sistema eléctrico de varios países en vías de desarrollo; cuáles son las

tecnologías disponibles actualmente en el mercado y sus costos de adquisición, montaje, operación y mantenimiento; así como las investigaciones llevadas a cabo por varias instituciones respecto al desarrollo de tecnologías domesticas para el aprovechamiento de las FER. Se llegó a la conclusión de que las tecnologías disponibles no son factibles de adquisición para estos fines, por sus costos y complejidad en zonas no interconectadas para familias pobres. La Universidad Antonio Nariño trabaja en el desarrollo de micro tecnologías de bajo costo para llevar la energía eléctrica a zonas aisladas y se considera que las acciones y experiencias de la Universidad Antonio Nariño, sede Tunja, pueden ser generalizadas y potenciadas en muchas otras instituciones del país. Ello permitiría fortalecer las potencialidades para lograr resultados satisfactorios desde la formación de los estudiantes, contribuyendo a que egresen con mayores competencias y habilidades actualizadas, además de un nivel de conciencia superior sobre las FLER. Así, esos nuevos profesionales estarán en mejores condiciones para aportar resultados concretos que favorezcan o aceleren el proceso de llevar la electrificación a las zonas de país que aún carecen de tan preciado recurso.

RECONOCIMIENTO

La investigación descrita se realizó con equipos de medición adquiridos por el proyecto de investigación código 2016209 titulado “Estudio y Rediseño de un Sistema de Calefacción Solar de Agua”, financiado completamente por la Universidad Antonio Nariño, a la cual se agradece su contribución en el estudio de las fuentes de energía renovables para un planeta más limpio.

REFERENCIAS

Behrendt, L. (2015). *Taxes and incentives for renewable energy*. (KPMG´s Global Energy & Natural Resources, Ed.), *KPMG International* (2015th ed.), Germany.

Benavides, J. (2011). *Retos y oportunidades de las energías renovables en Colombia*. ONUDI, Consultoría Energía Renovable en Colombia, Bogotá, 2011.

Bernardelli, F. (2010). *Energía Solar Termodinámica en América Latina. Los casos de Brasil, Chile y México*. CEPAL, Naciones Unidas, Santiago de Chile.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook*. (L. John Willey & Sons, Ed.) (1st ed.). New York, USA.

Carta, J. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. Pearson Education S.A., Prentice Hall. Madrid.

Dumitrescu, O., Mălăel, I., Drăgan, V., & Gherman, B. (2015). The renewable energy generated by the Savonius wind turbine used for water extraction. *Recent Advances in Energy, Environment and Financial Sciences*, 141–146.

García, H., Corredor, A., Calderón, L., & Gómez, M. (2013). *Análisis costo-beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá, Colombia.

Martinez, I. (2015). *Termodinámica de la Atmósfera*.

PEDCTI. (2012). *La ciencia, la tecnología y la innovación al servicio del desarrollo regional*. (O. C. de C. y Tecnología, Ed.) (Primera). Tunja, Boyacá: Colciencias.

SIMULACIÓN MULTIDIMENSIONAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN MOTOR A COMBUSTIÓN INTERNA DE IGNICIÓN POR COMPRESIÓN

PhD. Yesid Ortiz Sánchez[*], PhD. Elkin G. Flórez Serrano[**]

[*] **Universidad Tecnológica de Pereira,** Facultad de Tecnología, Programa de Tecnología Mecánica.
Cra 27 No. 10-02, Pereira, Risaralda, Colombia.
Teléfono:+57 6 3137206, Fax:+57 6 3137360.
E-mail: yosanchez@utp.edu.co.
[**] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías Y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica.
Campus Universitario km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Colombia.
57 7 5685303 Ext 164.
E-mail: eflorez@unipamplona.edu.co.edu.co.

Resumen: Para realizar la simulación de flujo de fluido, spray de combustible y combustión en un motor a combustión interna, las condiciones de contorno en la geometría del motor requieren que sea especificada una temperatura en la superficie del sólido que está en la interface sólido/fluido, las cuales son difíciles de medir experimentalmente. Para obtener los valores de la temperatura en las fronteras se realiza una simulación multidimensional de un motor de ignición por compresión monocilindrico, usando paredes sólidas en el software *Converge CFD*, con combustión y transferencia de calor conjugado fluido/sólido. Considerando que las escalas de tiempo de transferencia de calor en el sólido son mayores a las del fluido, en la simulación se usa el enfoque *super cycling* para la solución de problemas de transferencia de calor conjugados. Se simulan 25 ciclos para el motor, donde la combustión es considerada usando la tasa de liberación de calor en función del ángulo de manivela, obtenida de combustión con un mecanismo cinético para n-dodecano ($C_{12}H_{26}$). En el ciclo final, cuando la transferencia de calor alcanza el régimen permanente se obtiene la temperatura en función del ángulo de manivela para las paredes sólidas que conforman el motor, la cual es usada como condiciones de contorno en nuevas simulaciones.

Palabras clave: Motor de ignición por compresión, transferencia de calor conjugado, combustión.

Abstract: To perform the simulation of fluid flow, fuel spray and combustion in an internal combustion engine, the boundary conditions in the geometry of the engine require that a temperature be specified at the surface of the solid that is in the solid/fluid interface, which are difficult to measure experimentally. To obtain the values of the temperature at the boundary, a multidimensional simulation of a single-cylinder compression ignition engine is performed, using solid walls in the *Converge CFD* software, with combustion and fluid/solid conjugate heat transfer. Considering that the time scales of heat transfer in the solid are greater than those of the fluid, in the simulation the *super cycling* approach is used for the solution of conjugated heat transfer problems. 25 cycles are simulated for the engine where combustion is considered using the rate of heat release as a function of the crank angle, obtained from combustion with a kinetic mechanism for n-dodecane

($C_{12}H_{26}$). In the final cycle, when the heat transfer reaches the permanent regime, the temperature is obtained as a function of the crank angle for the solid walls that make up the motor, which is used as boundary conditions in new simulations.

Keywords: Compression ignition engine, conjugate heat transfer, combustion.

1. INTRODUCCIÓN

El motor de combustión interna de ignición por compresión es un motor de alta eficiencia y por lo tanto genera economía de combustible. En este tipo de motor, una vez el combustible es inyectado se inicia la formación de la mezcla combustible-aire al final de la carrera de compresión, y las características de formación de ésta mezcla tienen una fuerte influencia en la combustión y en la formación de emisiones. El proceso de inyección y las condiciones termodinámicas del aire comprimido generan la auto ignición de la mezcla combustible dando inicio a la combustión y a la liberación de calor.

En el motor de combustión interna, el pistón alterna su posición con un movimiento lineal entre dos puntos definidos como punto muerto superior (PMS) y punto muerto inferior (PMI), y dicho movimiento lineal genera la rotación del cigüeñal mediante un mecanismo biela-manivela.

La tasa de liberación de calor depende de la evolución del spray de combustible, de la evaporación del combustible y del proceso de mezcla de combustible con el aire. La liberación de calor produce en los gases del cilindro una variación del estado termodinámico, que es aprovechada en forma de trabajo en el cigüeñal del motor. La combustión en motores diésel es un factor importante, y en este proceso se encuentran involucrados subprocesos como la inyección de combustible, la formación de mezcla, la ignición, formación de contaminantes y de óxidos de nitrógeno (NOx), y estos subprocesos pueden actuar de forma simultánea (Merker et al., 2009).

El combustible diésel usado comúnmente en los motores de ignición por compresión es un derivado del petróleo constituido por hidrocarbonos y contiene de 8 a 38 átomos de carbono en su cadena. En este tipo de motores se ha venido implementando el uso de biodiesel el cual es obtenido mediante trasesterificación de aceite vegetal (Demirbas, 2008).

Para el análisis numérico del proceso de atomización y combustión de spray de combustible se deben considerar todas las variables involucradas en el motor, y el flujo de aire admitido es un factor importante, el cual está relacionado con la presión y temperatura antes y después de la válvula de admisión, y con el área característica de la válvula de admisión (Heywood, 1988).

La transferencia de calor entre el fluido al interior del cilindro y las paredes es un fenómeno que influye en el estado termodinámico del fluido, en donde el calor es transferido entre el gas y las paredes por convección, conducción y radiación tal y como se muestra en la Fig. 1, donde T_g es la temperatura del gas, $T_{g,w}$ es la temperatura de la pared del lado del gas, $T_{w,c}$ es la temperatura de la pared del lado del fluido de enfriamiento y T_c es la temperatura del fluido de enfriamiento.

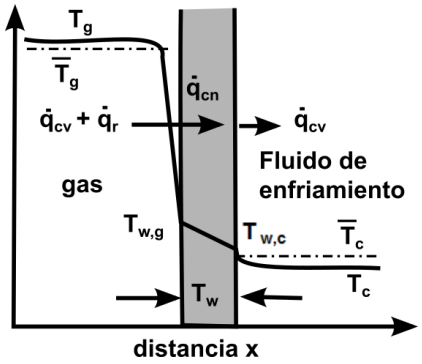


Fig. 1. Mecanismos de transferencia de calor en el motor (Adaptado de (Heywood, 1988)).

El flujo al interior del cilindro tiene interacción de capas turbulentas, capa límite y regiones de

recirculación, teniendo fluctuaciones de un ciclo a otro del motor. Para obtener numéricamente el campo de velocidad, de temperatura y de presión del fluido es necesario solucionar un sistema de ecuaciones que consiste en la ecuación de conservación de masa, ecuación de cantidad de movimiento, ecuación de energía y ecuación de estado (Richards *et al.,* 2016).

La geometría usada para la simulación es tridimensional (Fig. 2), la cual está conformada por ducto de admisión, cilindro, pistón, ducto de escape, válvula de admisión y válvula de escape. Las características del motor se relacionan en la tabla 1.

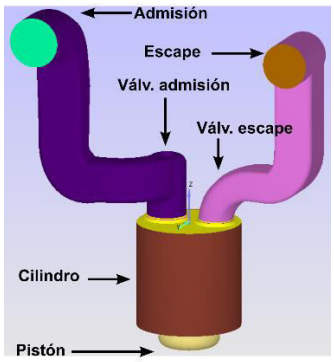


Fig.2. Geometría del motor (Fuente: Autor).

La geometría mostrada en la Fig. 1 considera como fronteras la entrada de fluido, salida de fluido y la pared de los siguientes componentes: cilindro, pistón, cabezote, inyector, válvula de admisión, válvula de escape, ducto de admisión y ducto de escape.

Tabla 1: Especificación del motor

Ítem	Especificación
Clasificación	Diésel, 4 tiempos, 1 cilindro
Sistema de inyección	Directa
Diámetro del cilindro	115 mm
Desplazamiento	115 mm
Cilindraje	1194 cm^3
Compresión	17,3
Potencia continua	14,7 kW / 2200 rpm

Como condiciones de frontera en las paredes del motor es necesaria la temperatura media en los componentes sólidos que conforman las fronteras o la temperatura de las superficies internas de los sólidos en función del ángulo de manivela. Para obtener esta temperatura en cada componente sólido y poder realizar la simulación de los fenómenos al interior del cilindro, tal como la combustión de spray, es necesario realizar pruebas experimentales en el motor (Torregrosa *et al*., 2012), lo cual resulta costoso o se pude hacer la simulación numérica de la trasferencia de calor en el motor y obtener dichas temperaturas.

En las siguientes secciones se describe la metodología usada y los resultados de la simulación numérica de transferencia de calor en el motor considerando combustión, con el objetivo de obtener la temperatura media en cada una de las paredes sólidas que forman parte del motor.

2. MODELADO NUMÉRICO

El análisis de la transferencia de calor en el motor requiere de la solución del flujo de fluido en el interior del motor considerando combustión y de la solución de la transferencia de calor en las paredes sólidas y en el fluido.

2.1 Modelado del flujo de fluido

El fluido en el motor es considerado como compresible y transitorio, y para obtener los campos de velocidad, presión y temperatura de éste al interior del motor es necesario solucionar un sistema de ecuaciones de conservación y ecuación de estado. El flujo es turbulento con escalas de longitud, de velocidad y de tiempo pequeñas. Dados los parámetros de viscosidad cinemática (υ) y tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ε), estas escalas pequeñas son llamadas escalas de Kolmogorov.

Las ecuaciones que describen el flujo turbulento son las ecuaciones de Navier-Stokes en forma no estacionaria y tridimensional, las cuales necesitan de solución en escalas pequeñas de tiempo y espacio para obtener una descripción del flujo en detalle.

La solución del sistema de ecuaciones en flujo turbulento al interior del motor, en la simulación de transferencia de calor, es realizada mediante la a metodología de las ecuaciones de Navier-Stokes

promediadas por Reynolds (RANS) (Bejan, 2013). En flujo compresible, además de las fluctuaciones de velocidad y presión, es necesario tener en cuenta las fluctuaciones de densidad y temperatura, por lo tanto, se usa la media de Favre para expresar cualquier propiedad del fluido como la suma de un valor medio y una fluctuación, ambos ponderados por la masa (Wilcox, 1993; Kuo & Acharya, 2012). Las ecuaciones correspondientes en términos de media de Favre para fluido compresible son: ecuación de conservación de masa (ecuación 1), de conservación de cantidad de movimiento (ecuación 2), de conservación de energía (ecuación 3) y de estado (ecuación 4) (Wilcox, 1993), (Richards et al., 2016).

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}\widetilde{u_i}}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\widetilde{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}\widetilde{u_i}\widetilde{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \widetilde{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \widetilde{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial \widetilde{u_k}}{\partial x_k}\delta_{ij}\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\bar{\rho}\widetilde{u_i''u_j''}\right) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{e}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}\widetilde{u_j}\tilde{e}}{\partial x_j} = -\frac{p(\partial \widetilde{u_j})}{\partial x_j} + \sigma_{ij}\frac{\partial \widetilde{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(K\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\rho}D\sum_m \tilde{h}_m\frac{\partial Y_m}{\partial x_j}\right) + S \qquad (3)$$

$$\tilde{p} = \bar{\rho}R\tilde{T} \qquad (4)$$

donde σ_{ij} es el tensor de tensión. En este sistema de ecuaciones se obtiene un término adicional llamado Tensor de Reynolds, que consiste en seis incógnitas escalares adicionales en el sistema de ecuaciones, generando un problema para la solución. El Tensor de Reynolds está definido por la ecuación 5:

$$R_{ij} = -\bar{\rho}\widetilde{u_i''u_j''} \qquad (5)$$

La solución del sistema de ecuaciones usando RANS, se realiza con el modelo de viscosidad turbulenta $k-\varepsilon$ RNG (Renormalization Group) basado en la solución de las ecuaciones de transporte de energía cinética turbulenta (k) y en la ecuación de tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ε), con el modelado de la viscosidad turbulenta mediante la ecuación 6 (Wilcox, 1993).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \qquad (6)$$

Para la solución numérica de las ecuaciones se usa el Software *Converge CFD,* el cual es un programa de dinámica de fluidos computacional que emplea el método de volúmenes finitos, desarrollado principalmente para motores de combustión interna, con un generador automático de malla ortogonal estructurada basado en parámetros dados por el usuario.

2.2 Modelado de la transferencia de calor

En el análisis de transferencia de calor en las paredes del motor se usa la geometría completa del motor mostrada en la Fig. 1 con paredes sólidas sin ductos de refrigeración. La simulación se realiza en el software *Converge CFD* usando el modelo de transferencia de calor conjugado (*Conjugate Head Transfer*), ya que la transferencia de calor ocurre en sólidos y en fluidos. Con la metodología *Conjugate Head Transfer* se resuelve simultáneamente los campos de temperatura de la parte solida y del fluido en el motor considerando combustión.

Para simular transferencia de calor simultáneamente en sólidos y líquidos, se debe considerar que las escalas de tiempo de transferencia de calor en sólidos son mayores a las escalas de tiempo en el fluido, por lo tanto, se usa la metodología *super cycling* para problemas de transferencia de calor conjugados, la cual en términos generales es así:

a. Se resuelven las ecuaciones en el fluido y en el sólido, pero no se almacenan los datos de transferencia de calor en el sólido desde el inicio de la simulación hasta un tiempo llamado tiempo de inicio del súper ciclo. Cuando se llega al tiempo de inicio del súper ciclo se comienza a almacenar valores para coeficiente de transferencia de calor (HTC) y de temperatura en cada celda próxima a la pared en la interface solido/fluido para cada intervalo de tiempo.
b. Se continúa resolviendo las ecuaciones en el fluido y en el sólido, almacenando datos de HTC y temperatura en las celdas cerca a la

interface por un tiempo llamado intervalo de estado de súper ciclo.

c. Cuando se termina el tiempo de intervalo de súper ciclo se realiza una pausa en el solver del fluido y se calcula una media de HTC y de temperatura para cada celda cercana a la interface basándose en los valores almacenados previamente. Se realiza el cálculo de transferencia de calor en el sólido en este momento con los valores medios de HTC y de temperatura, considerando estado estable.
d. Después de realizar el cálculo de transferencia de calor en el sólido, la temperatura del sólido representa la temperatura en estado estacionario, y esta temperatura es un pico de temperatura en el inicio de un nuevo súper ciclo.
e. Después del cálculo de la temperatura en el sólido, se inicia de nuevo el solver del fluido para resolver nuevamente las ecuaciones de fluido y sólido por un tiempo igual al intervalo de estado de súper ciclo, y se continúa el proceso de acuerdo con los súper ciclos establecidos en la simulación.

La simulación se realiza para una velocidad del motor de 1800 rpm usando como parámetro de avance en el tiempo el ángulo de manivela en grados con intervalo de tiempo variable: un tiempo mínimo equivalente a 2,0E-8 segundos y tiempo máximo de 4,9E-5 segundos.

Las características del flujo en el motor tienen dependencia del tamaño de malla lo cual hace difícil escoger el tamaño de malla adecuada. Por este motivo se verifica la dependencia de la presión del fluido y de la energía cinética turbulenta, en relación al tamaño de malla, usando mallas base de tamaño 6, 4 y 3 mm y en cada caso se aplica *Adaptive Mesh Refinement* (AMR) con una escala de 2 en el interior del cilindro para el fluido. Tanto para la presión como para la energía cinética turbulenta se obtiene como resultado que para tamaños de malla de 4 y 3 mm el comportamiento de estos parámetros guarda a misma tendencia y valores casi próximos, por lo tanto, se usa una malla base de 4 mm.

Las fronteras que conforman el sistema son las paredes del cilindro, del pistón (frontera móvil), del cabezote, del inyector, de la válvula de admisión (frontera móvil), de la válvula de escape (frontera móvil), del ducto de admisión y del ducto de escape. Adicionalmente se tiene la frontera de entrada de fluido al motor y de salida de fluido del motor. Como condiciones de contorno en la entrada de fluido al motor se usan datos experimentales de presión y temperatura en función del ángulo de manivela y las especies corresponden a las componentes del aire. Las condiciones de contorno en la salida son consideradas de datos experimentales para las especies y para la temperatura, y para presión se considera la presión atmosférica.

Para el fluido, las condiciones iniciales en el ducto de admisión se considera una temperatura media tomada de los datos experimentales en la entrada, presión atmosférica y especies correspondientes al aire. En el ducto de escape como condiciones iniciales se considera la temperatura medida para los gases de escape, la presión atmosférica y las especies medidas experimentalmente en el escape. En el cilindro del motor, la condición inicial de presión del motor corresponde a la medida experimentalmente, la temperatura obtenida de forma teórica usando datos experimentales de presión y las especies son consideradas las mismas medidas experimentalmente en el escape.

En la simulación de transferencia de calor, se inicia el almacenamiento de datos en 60°, y se define in tiempo de intervalo de estado de súper ciclo de 60°. Son simulados en total 25 ciclos del motor, dividida en 5 simulaciones de 5 ciclos cada una, considerando que las condiciones finales obtenidas en cada simulación previa corresponden a las condiciones iniciales de la siguiente simulación. La combustión es considerada usando la tasa de liberación de calor en el motor, obtenida de simulación de combustión de n-dodecano ($C_{12}H_{26}$) usando un mecanismo cinético de 102 especies y 420 reacciones.

Las condiciones iniciales de temperatura en las regiones sólida para la simulación de los 5 primeros ciclos son tomadas de datos generales usados en sesiones de *Converge CFD* para motores de ignición por compresión. Las condiciones iniciales de temperatura, presión, energía cinética turbulenta, tasa de disipación de energía cinética turbulenta y especies para el fluido son tomadas de

los resultados de la simulación de combustión de n-dodecano.

Las condiciones de contorno de temperatura en la pared externa que conforman la geometría del motor, es dada en flujo de calor por unidad de área ($q^{''}$). Mediante una simulación inicial del motor en donde se considera combustión de n-dodecano, se obtiene para cada grado de giro de la manivela el área de transferencia de calor (A_{int}) y el flujo de calor ($\dot{Q}$) desde el fluido en el interior del motor, hacia la pared interna de cada uno de los componentes sólidos del motor, para obtener el flujo de calor por unidad de área. La simulación considerada para obtener estos datos iniciales de calor transferido es realizada usando paredes del motor sin espesor, y la transferencia de calor se da desde los volúmenes de fluido adyacente a cada pared, hacia la superficie sólida, como ha sido obtenido por otros investigadores para motores diésel (Taghavifar *et al.*, 2015). En la fig. 3 se muestra el flujo de calor por unidad de área desde el fluido hacia la superficie interna de cada uno de los componentes del motor, en función del ángulo de manivela, considerando que el punto muerto superior donde ocurre la combustión corresponde a 0º, y en este ángulo de manivela se obtiene la mayor transferencia de calor debido a la liberación de energía dada por la combustión, (Spitsov, 2013).

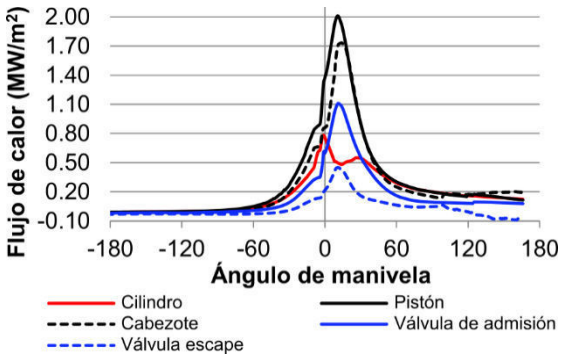


Fig. 3. Flujo de calor por unidad de área en superficies internas del motor. (Fuente:Autor)

El flujo de calor por unidad de área en las superficies externas de cada uno de los componentes del motor en función del ángulo de manivela, se obtiene considerando el calor transferido y el área externa. El área externa de cada componente se obtiene mediante el software *Converge CFD*.

En *Converge CFD*, para cada una de las superficies externas del motor, es asignada como condición de contorno de temperatura, el flujo de calor por unidad de área en función del ángulo de manivela para un ciclo completo, el cual inicia en -360º y termina en 360º.

Los materiales usados para el sólido son acero y aluminio.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la simulación de transferencia de calor para los primeros cinco (5) ciclos del motor, son analizados en función del ángulo de manivela con el objetivo de ver la variación de la temperatura de un ciclo a otro. En esta simulación se obtiene el valor de $q^{''}_{ext}$ en los diferentes sólidos y estos valores son usados como condición de contorno en las paredes externas para una nueva simulación de transferencia de calor.

La Fig. 4 muestra la temperatura media en cada región de fluido en función del ángulo de manivela para los 5 primeros ciclos del motor. En esta figura se observa que la temperatura en el fluido presenta variaciones de un ciclo a otro, principalmente en las temperaturas máximas. La variación de temperatura de un ciclo a otro representa el estado transitorio del motor en cuanto a su temperatura en cada uno de los componentes.

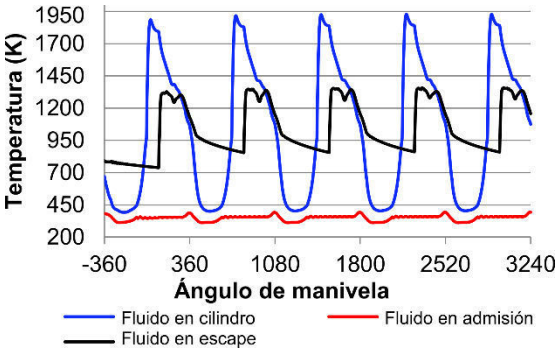


Fig. 4. Temperatura media en regiones de fluido para los primeros 5 ciclos. (Fuente:Autor)

Los componentes sólidos del motor tienen menores variaciones de temperatura de un ciclo a otro en

comparación al fluido, de acuerdo a lo mostrado en la Fig. 5. En esta figura se puede observar que los componentes sólidos van aumentando su temperatura, a medida que ocurren nuevos ciclos del motor, y este aumento de un ciclo a otro no es tan considerable si se compara al del fluido (Bovo, 2014).

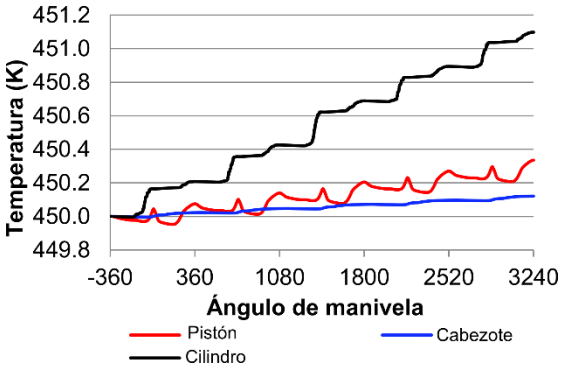


Fig. 5. Temperatura media en regiones sólidas para los primeros 5 ciclos. (Fuente:Autor)

El comportamiento de la temperatura en los sólidos para los ciclos iniciales del motor se debe principalmente a los efectos producidos por la combustión.

Analizar la temperatura de la frontera sólida en la interface sólido/fluido, permite ver la variación en función del ángulo de manivela de un ciclo a otro como se muestra en la Fig. 6.

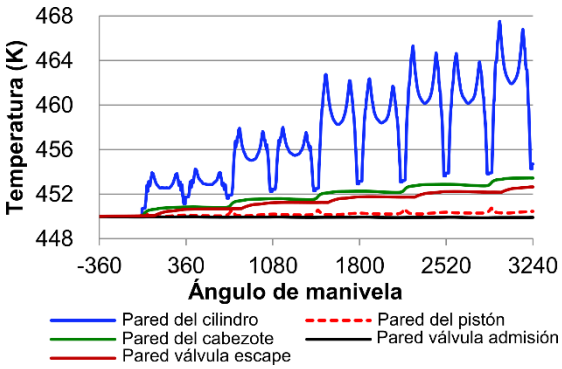


Fig. 6. Temperatura media en la frontera sólida en la interface sólido/fluido para los primeros 5 ciclos. (Fuente:Autor)

En la Fig. 6 se puede observar que la temperatura media de las paredes del sólido en la región interna del motor, comienza a aumentar de un ciclo a otro influenciada principalmente por la elevada temperatura en el proceso de combustión.

En el análisis de los resultados obtenidos en la simulación de los 5 primeros ciclos del motor, en términos generales se observa que la temperatura tanto de los componentes sólidos como del fluido en el motor, sufren una variación de ciclo a ciclo, tendiendo a aumentar. De los resultados obtenidos en la simulación de los 5 primeros ciclos del motor se obtienen los siguientes datos, para ser usados en una nueva simulación: condiciones iniciales de temperatura en el fluido, condiciones iniciales de temperatura en los sólidos, condiciones de contorno en las paredes externas con nuevos valores q''_{ext} .

La Fig. 7 muestra la temperatura media en los componentes sólidos del motor para los cinco ciclos finales. En esta figura es posible ver que el cilindro, el pistón y el cabezote tienen temperaturas con valores cercanos entre si y que la variación de la temperatura entre un ciclo y otro es pequeña. Para la válvula de admisión y la válvula de escape la mayor variación de temperatura se presenta en el ángulo de manivela donde hay combustión, ya que estos elementos son de menor tamaño que los otros tres sólidos.

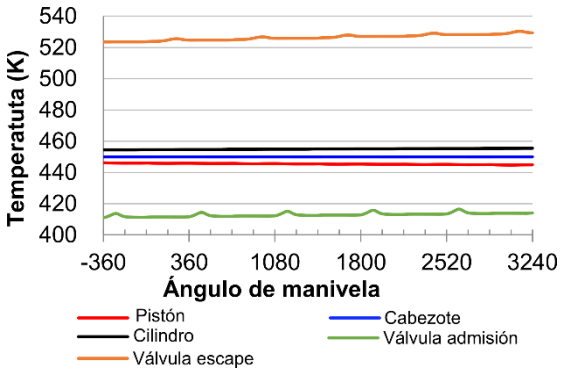


Fig. 7. Temperatura media en regiones sólidas para los últimos 5 ciclos. (Fuente:Autor)

En la Tabla 2 se especifica la temperatura media de los sólidos en el último ciclo del motor, y de acuerdo a los datos generados en la simulación y a los observado en la Fig. 7, estas temperaturas en los ciclos finales no presentan variación considerable de ciclo a ciclo.

Tabla 2: Temperatura media de los sólidos en el ciclo final

Sólido	Temperatura (K)
Pistón	445
Cabezote	450
Válvula de admisión	414
Válvula de escape	529
Cilindro	455

En la frontera sólida de la interface sólido/fluido, de acuerdo a la Fig. 8, el comportamiento de la temperatura de un ciclo a otro no presenta variaciones considerables al ser comparadas con el comportamiento de estas mismas fronteras en los cinco ciclos iniciales (Fig. 6). La mayor variación de temperatura en un mismo ciclo se presenta en la superficie interna del cilindro, considerando que esta superficie interna tiene un área de transferencia de calor variable de acuerdo al movimiento del pistón, con un área máxima cuando el pistón está en el PMI y un área mínima cuando el pistón está en el PMS. Las otras superficies internas del motor no presentan estas oscilaciones en su temperatura, y también se considera que su área superficial de transferencia de calor es constante. Las temperaturas en cada uno de los componentes sólidos del motor, dependen de la combustión en un motor, considerando que la ignición y el avance del frente de llama ocurre en ciertos puntos al interior del cilindro (Li y Kong, 2011).

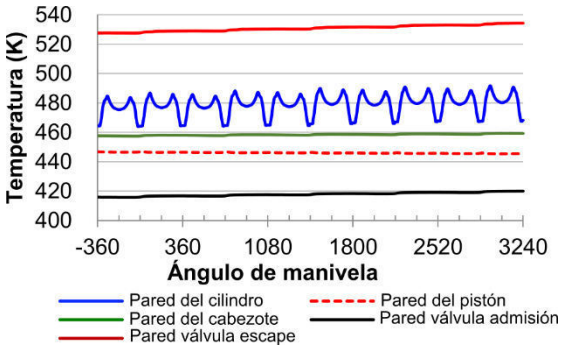


Fig. 8. Temperatura media en la frontera sólida en la interface sólido/fluido para los últimos 5 ciclos. (Fuente:Autor)

La variación en el área de transferencia de calor de la superficie interna del cilindro se puede observar en la Fig. 9, donde se representa un perfil de temperatura de cada una de las regiones sólidas y de las regiones de fluido en el cilindro, para la etapa de escape en el motor. En esta figura se observa que la mayor temperatura corresponde al fluido que se está expulsando hacia el ducto de escape.

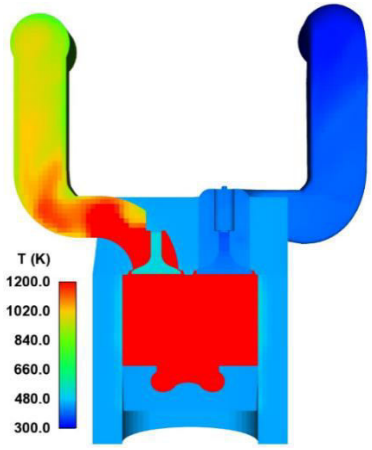


Fig. 9. Perfil de temperatura en las diferentes regiones del motor en la etapa de escape. (Fuente:Autor)

Las temperaturas medias de las regiones de fluido presentan variaciones grandes en un mismo ciclo, debido a que la temperatura del fluido depende de cada una de las etapas del ciclo, principalmente durante la admisión, la compresión y la combustión.

4. CONCLUSIONES

Se realiza la simulación multidimensional de transferencia de calor en un motor de combustión interna, considerando combustión y se observa que en los resultados de los últimos cinco ciclos del motor no se detecta variación en la temperatura media de los componentes sólidos del motor.

Mediante esta metodología se obtiene la temperatura media para ser usada como condición de contorno en la simulación de los procesos de spray y combustión de spray en donde se usan paredes del motor sin espesor como se muestra en la Fig. 2.

La temperatura de la superficie interna del sólido (interface solido/fluido), se considera un dato importante para ser usado como condición de contorno con temperatura en función del ángulo de manivela, principalmente en simulaciones donde se requiere tener en cuenta que la temperatura de las superficies internas varía en función del ángulo de manivela.

Un análisis adicional usando los resultados dados por el software *Converge CFD*, es el de medir la pérdida de energía por transferencia de calor en el motor para un ciclo, con el objetivo de realizar el balance de energía en el motor.

REFERENCIAS

Merker G., P.; Schwarz C., y Teichmann R. (2009). *Combustion Engines Development*, Editorial Springer, Alemania.

Turns S., R. (2000). *An Introduction to Combustion*, Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos.

Demirbas A. (2008). *Biodiesel*, Editorial Springer. Alemania.

Heywood J., B. (1998) *Internal Combustion Engines Fundamentals*, Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos.

Richards K., Senecal P., y Ponraning E. (2016). *Converge V2.3 Manual*, Convergent Sience Inc, Estados Unidos.

Torregrosa A. J., Bermúdez B., Olmeda P., Fygueroa O. (2012). Experimental assessment for instantaneous temperature and heat flux measurements under Diesel motored engine conditions. Energy Conversion and Management No. p. 57–66.

Bejan A. (2013). *Convection Heat Transfer*, Editorial John Wiley & Sons, Inc, Cuarta edición, Estados Unidos.

Wilcox D., C. (1993). *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc, Estados Unidos.

Kuo K., Acharya R. (2012). *Fundamentals of Turbulence and Multiphase Combustion*, Editorial John Wiley & Sons, Inc, Estados Unidos.

Taghavifar H., Tahjavifar Ha., Mardani A., Mohebbi A., Khalilarya K. (2015). *A numerical investigation on the wall heat flux in a DI diesel engine fueled with n-heptane using a coupled CFD and ANN approach*. Fuel No. 140 p. 227-236.

Spitsov O. (2013). *Heat transfer inside internal combustion engine: modelling and comparison with experimental data*. Tesis de Maestria, Lappeenranta University of Technology.

Bovo M. (2014). *Principles of Heat Transfer in Internal Combustion Engines from a Modeling standpoint*. Tesis de Doctorado. Chalmers University of Technology. Suiza.

Li Y. y Kong S. (2011). *Coupling conjugate heat transfer with in-cylinder combustion modeling for engine simulation*. International Journal of Heat and Mass Transfer No. 54, p. 2467–2478

SIMULACIÓN DE UN ALABE DE AEROGENERADORPARA BAJAS POTENCIAS Y BAJAS VELOCIDADES

Ing. Brayan Y. Conde Pabón[*], Ph.D. Elkin G Florez[*], Ph.D. Juan Carlos Serrano Rico[*]

[*] Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, GIMUP (Grupo de investigación en ingeniería mecánica de la Universidad de Pamplona.
Km 1 vía Pamplona-Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Teléfono: (57+7) 5685303 - 5685304.
E-mail: {brayan.conde, eflorez, jcserrano}@unipamplona.edu.co.

Resumen: En este artículo se presenta la simulación de un aerogenerador de eje horizontal de tres álabes, para baja velocidad y baja potencia, mediante la ayuda de un software comercial de CFD. La geometría de los álabes es determinada acoplando los perfiles aerodinámicos; WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042, para la raíz, la región media y para la punta del álabe, respectivamente. Estos perfiles aerodinámicos son acoplados mediante interpolación geométrica, con la ayuda del software SOLIDWORKS. Por otra parte, utilizando el software de diseño y análisis de perfiles aerodinámicos XFOIL, se caracterizó el rendimiento aerodinámico del álabe. Las simulaciones se desarrollaron para velocidades de viento entre 5 m/s y 10 m/s. A partir de los resultados de estas últimas, se determinaron las características de desempeño del aerogenerador, tales como; la velocidad de rotación, la potencia de salida y el coeficiente de potencia. Finalmente, se analizaron las fluctuaciones de presión sobre la superficie del alabé y la distribución de esfuerzos a lo largo del mismo, con el objetivo de realizar el diseño estructural del aerogenerador.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo serán utilizados, en una segunda fase de la investigación, para la construcción de un modelo que permita validar el comportamiento tanto aerodinámico como mecánico del aerogenerador, lo cual contribuirá en la construcción del prototipo que se implementará en campo.

Palabras clave: aerogenerador, energía eólica, CFD.

Abstract: In this paper presents the simulation of a three-bladed wind turbine of horizontal axis, for low speed and low power using a commercial CFD software. The blades geometry is determined coupling the aerodynamic profiles; WORTMANN FX 60-126, SG043 and SG042, for the root, the middle region and for the tip of the blade, respectively. Using the SOLIDWORK software, the aerodynamic profiles were coupled through geometric interpolation. Moreover, using the XFOIL software for design and aerodynamic profiles analysis, the aerodynamic performance of the blade was characterized. The simulations were developed for wind speeds between 5 m/s and 10 m/s. With the results of the simulations, the performance characteristics of the wind turbine were determined, such as; the rotation speed, the output power and the power coefficient. Finally, the pressure field on the blade surface and the strength distribution along the same were analyzed, these with the aim to obtain the structural design of the wind turbine.

The results obtained in the present work will be used, in a second phase of the research, for the construction of a physical model to validate the aerodynamic and mechanical behavior

of the wind turbine, which will contribute to the construction of the prototype to be implemented in field

Keywords: wind turbine, wind energy, CFD.

Area: (Energías renovables)

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales han crecido de manera exponencial en los últimos años, llegando a ser un tema inevitable para cada país o persona en el planeta, donde las economías giran en torno a la explotación energética de los derivados fósiles, agotando las reservas de los mismos e influyendo negativamente en los ecosistemas y cambios climáticos presentes en la actualidad [1].

Las energías renovables como la solar, la biomasa, térmica, mareomotriz entre otras son alternativas empleadas actualmente. Sin embargo, la energía eólica ha ocupado un lugar de preeminencia en la actualidad, por la capacidad instalada y la sostenibilidad económica que ofrece a mediano y largo plazo. Convirtiéndose en una de las tecnologías de mayor crecimiento, gracias al potencial de generación que existe en diversos países y estando en el foco de numerosas investigaciones alrededor del mundo. Donde se espera que el crecimiento de la capacidad instalada de energía eólica aumente en 3GW para finales del año 2020 [2].

Las investigaciones para la implementación de sistemas de generación eólica van de la mano con el estudio de aerogeneradores, que son máquinas creadas para poder aprovechar el recurso eólico y son clasificados según su eje de rotación en dos tipos de eje horizontal (eje paralelo a la dirección del viento) o de eje vertical (eje perpendicular a la dirección del viento) y están compuesto por elementos, que permiten convertir la energía cinética de las partículas de viento, en energía cinética rotacional y posteriormente en energía eléctrica. El elemento que tiene mayor influencia en el diseño de los aerogeneradores son los álabes o cuchillas, pues estos se encargan de captar la energía mecánica del viento, fundamentados en la aerodinámica buscando el perfil de álabe optimo, que permita aprovechar la mayor cantidad de energía proporcionada por el viento, evitando la creación de perturbaciones del mismo que puedan acarrear un mal funcionamiento del aerogenerador [3].

Esta investigación, se enfocó en estudiar el comportamiento de un aerogenerador de eje horizontal, cuyos álabes están basados en los perfiles aerodinámicos de las familias WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042, para la raíz, la región media y para la punta del álabe, respectivamente. Estos perfiles aerodinámicos fueron acoplados mediante interpolación geométrica, con la ayuda del software SOLIDWORKS basándose en la investigación realizada por Pabón Rojas [4] donde las familias seleccionadas se caracterizaron por cumplir con el mejor funcionamiento al realizar una comparación entre los distintos perfiles encontrados en diferentes bases de datos. estudiando el comportamiento de todo el conjunto (aerogenerador de baja potencia y baja velocidad) realizando el análisis aerodinámico con ayuda del software ANSYS 2016 y el método de CFD FLUENT [5].

2. PARTE EXPERIMENTAL.

La simulación del aerogenerador se realizó con ANSYS 16.0, el cual es un software para la solución de problemas de ingeniería a través de elementos finitos, para el caso en particular del estudio en esta investigación se implementó a través de FLUENT, dando solución a los problemas que involucran el flujo de fluidos y tiene mayores prestaciones en la aplicación de problemas tridimensionales.

Siguiendo con la lógica de ANSYS para dar solución a los problemas de este tipo, se parte de definir el mecanismo para la solución de las

ecuaciones matemáticas y para lo cual ANSYS tiene dos secciones que involucran fluidos y esos dos métodos son el FLUENT y el CFX. Como se mencionó anteriormente se trabajó con FLUENT donde su método de solución es más adecuado cuando el flujo es externo

Después de seleccionar el método de solución que se implementó (FLUENT), se debían acomodar los parámetros del pre-procesamiento, procesamiento y el pos-procesamiento, los cuales sirven para definir geometría (Modeler), realizar el mallado (Mesh), procesar los datos y hallar la solución del problema para finalmente verificar que la solución del problema haya convergido correctamente.

Para la geometría a ser estudiada se puede realizar de dos formas, la primera es diseñándola por medio del CAD incluido en ANSYS que es el modeler o la segunda es importando la geometría dibujada en otro software CAD y que se haya guardado previamente en formato compatible con ANSYS ya sea él .iges o el parasolid (T_X) donde este último es el que genera mayor compatibilidad con ANSYS. El método empleado fue el segundo ya que realizar la geometría del aerogenerador es más complejo a través del Modeler que cuenta con formas primitivas como los son cubos, cilindros y esferas entre otros por lo que para realizar las curvas aerodinámicas del aerogenerador es más sencillo con un software CAD externo. En la figura 1 se puede observar el álabe conformado por los diferentes perfiles aerodinámicos y que está diseñado para un ángulo de ataque de 25.34° que es que da las mejores prestaciones según Rojas Pabón [4].

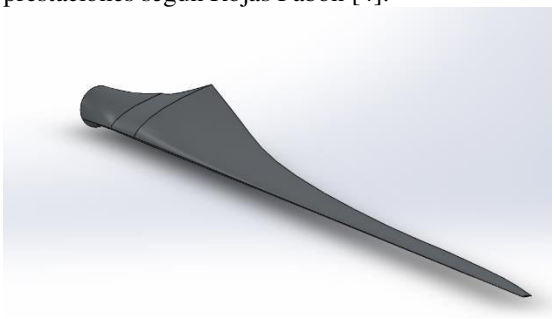


Fig. 1. Álabe diseñado para el aerogenerador de baja potencia y baja velocidad

Al montar el conjunto del aerogenerador se pudo observar lo mostrado en la figura 2 y se guardó en formato parasolid esto para no generar conflicto al exportar la pieza al modeler. Donde también se montó el túnel de viento con ayuda de las operaciones del Modeler los cuales fueron realizadas con la herramienta sketch



Fig. 2. Conjunto del aerogenerador formado por los tres álabes

Para evitar gasto computacional innecesario se opta por hacer la simulación de la parte referente a los álabes y al rotor del aerogenerador quedando la geometría que se observa en la figura 3 y a la cual también se le realizó el mallado. Sin embargo, al observar la simetría del aerogenerador se opta por generar el estudio de un tercio de la geometría y cuando se desee visualizar los resultados por simetría se complementará la misma. En la figura 4 se observa la geometría del álabe con su respectivo ángulo de ataque calculado por Rojas Pabón el cual es de 25.34°.



Fig. 3. Conjunto empleado para la simulación aerodinámica.

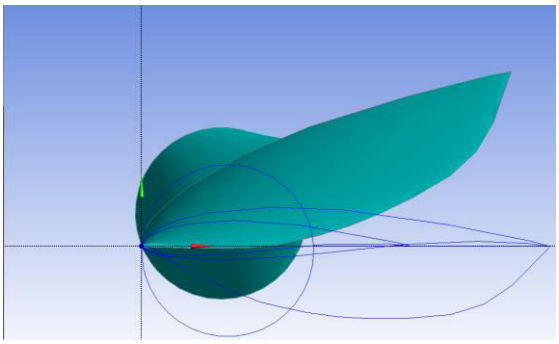


Fig. 4. Angulo de ataque del álabe 25.34°.

En la figura 5a y 5b se representa el dominio empleado para las simulaciones. Donde el elemento A representa el álabe y las distancias D1, D2 y D3 representan las dimensiones del espacio de estudio tomando como base lo expresado por Sebastien Lachance-Barrett y Edwin Corona D1 que es el radio de la entrada del volumen de control, el cual se toma como el doble del radio del aerogenerador es decir el segmento del cubo y el álabe que para el caso de este estudio fue de 0.85 m (metros). La distancia D2 es la salida del volumen de control y es el doble del radio de la entrada (D1). Finalmente, D3 es la distancia entre la entrada y la salida del volumen de control la cual se tomó aproximadamente como 6 veces el radio del aerogenerador.[6]

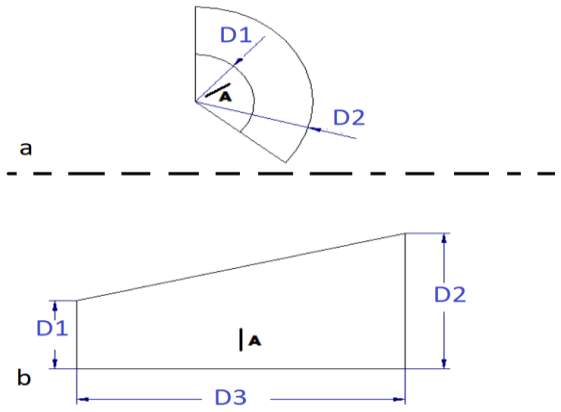


Fig. 5. Dominio de simulación

El los elementos de malla empleados para esta geometría se generaron por defecto a través del software creando una malla más fina en la zona cercana al análisis más crítico, el cual está en el fluido cerca al álabe por lo que se tuvo que generar una zona de alta influencia en forma esférica que envuelve el álabe y esto permitió generar una mayor cantidad de elementos para el análisis dentro del volumen de control esto se observa en las figuras 6 donde está el mallado realizado de manera automático, figura 7 la esfera que facilita el análisis en la zona cercana al álabe y figura 8 donde está el mallado generado después de crear la zona de alta influencia.

En la tabla 1 se muestran los datos más relevantes entre las dos maneras de hacer mallado, básicamente varia en el número de nodos y elementos a los que se les realizará el estudio.

Tabla 1: Diferencia entre los dos métodos de mallado

	Por defecto	Con zona de influencia
No. de nodos	62060	252955
Elementos	353781	1465301

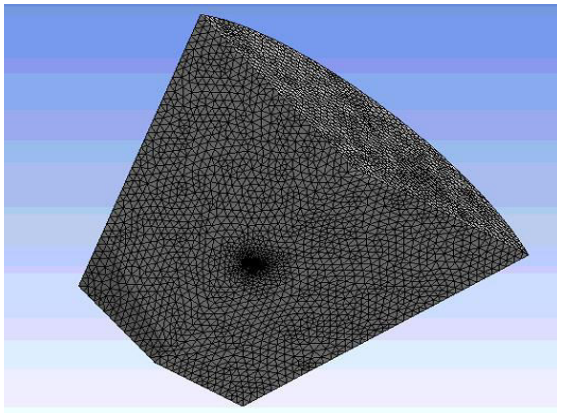


Fig. 6. Mallado generado por defecto.

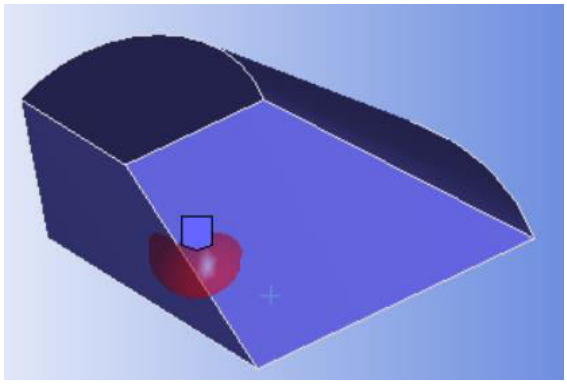


Fig. 7. Generando zona de influencia alrededor del álabe

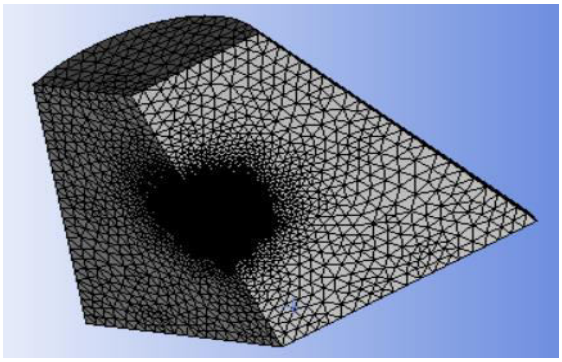


Fig. 8. Malla con la zona de influencia.

En la tabla 2, se pueden observar los parámetros más importantes a tener en cuenta para dar solución a este problema con las condiciones de frontera y métodos que faciliten la solución del mismo. Partiendo de algunos parámetros del equipo de cómputo, seleccionando un nivel de precisión doble la cual disminuye el margen de error en la solución y la cantidad de núcleos empleados para resolver el problema. Y se seleccionó el modelo viscoso K omega SST ya que como lo menciona Pabón Rojas [4] en base a lo expresado por (Maia, Santos Lopes, Silveira, Andrade, & Filho) y Carrizales Rodríguez quienes defines este método como lo suficientemente robusto para realizar un análisis tridimensional al tener en cuenta cizallamiento y tensiones por el intercambio de cantidad de movimiento en el volumen de control y cuya formulación para el método de solución se expresa a través de las ecuaciones 1 y 2 que son similares al método estándar y la evaluación de los diferentes coeficientes se expresan en las ecuaciones de la 3 a la 10 las cuales son explicadas en diversos tutoriales web del software Ansys todo esto con el objetivo de comprender mejor la parte interna en la solución de diversos problemas [6].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - Y_k + S_k \quad \textbf{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad \textbf{2}$$

En la ecuación 3 se representan los coeficientes de difusividad efectiva que dependen del número de Prandtl para $k\ y\ \omega$. Además, de incorporar la viscosidad turbulenta que es calculada en la ecuación 4, en la cual la S representa la tasa de deformación y es expresada en la ecuación 5.

$$T_{(k,\omega)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{(k,\omega)}} \quad \textbf{3}$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}\frac{1}{\max\left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right)} \quad \textbf{4}$$

$$\sigma_{(k,\omega)} = \left(\frac{F_1}{\sigma_{(k,\omega)1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{(k,\omega)2}}\right)^{-1} \quad \textbf{5}$$

Los coeficientes tales como $F_1, F_2, \Phi_1\ y\ \Phi_2$ que están expresados en las ecuaciones de la 6 a la 9.

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad \textbf{6}$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad \textbf{7}$$

$$\Phi_1 = \min[\max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega + y^2}] \quad \textbf{8}$$

$$\Phi_2 = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right) \quad \textbf{9}$$

Finalmente en la ecuación 10 se puede observar el cálculo de la variable $D\omega$ requerida en la ecuación 8.

$$D_\omega = \max[2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega,2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}] \quad \textbf{10}$$

Cabe resaltar que el número de iteraciones se determinó como 1500 siguiendo datos presentados por Sebastien Lachance-Barrett y Edwin Corona [7]sin embargo para el caso particular de está simulación y como se puede observar en la figura 9 converge después de las 300 es por esta razón que se trabajó con número de iteraciones entre las 350 y 400 en algunos casos esto para generar el menor gasto computacional.

Tabla 2: Condiciones de operación

Parámetro	Selección
Precisión	Doble
Núcleos de procesamiento	Tres en paralelo
Modelo Viscoso	K omega SST

Fluido	aire estándar
Velocidad rotacional	-56 rad/s
Velocidad eje x entrada y alrededores	0 m/s
Velocidad eje estrada y alrededores y	0 m/s
Velocidad eje z entrada y alrededores	-12 m/s
% de Turbulencia	5%
Razón de turbulencia-viscosidad	10
Presión	1 atm (atmosfera)

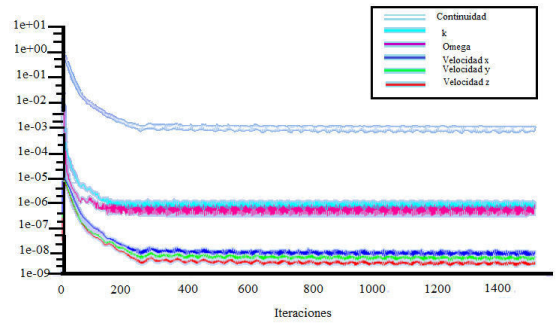


Fig. 9. Número de iteraciones empleadas para convergencia de la solución.

3. RESULTADOS

En las figuras 10 y 11 se observan los vectores velocidad y presiones sobre el álabe respectivamente.

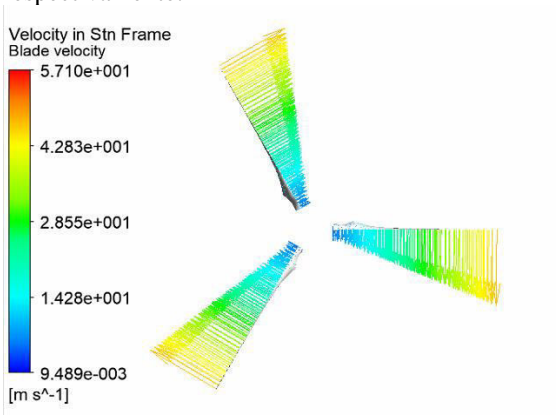


Fig. 10. Vectores velocidad sobre el álabe

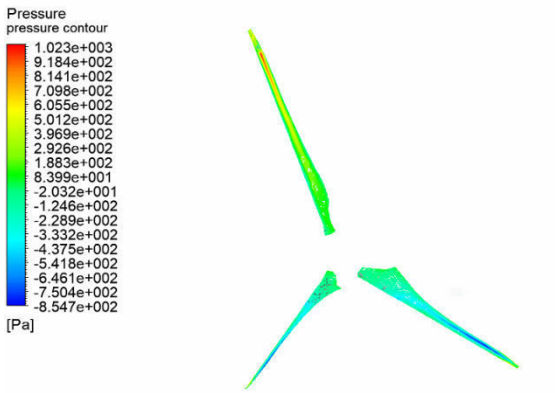


Fig. 11. Número de iteraciones empleadas para convergencia de la solución.

Se calculó el torque generado por el aerogenerador con ayuda de Ansys el cual arrojó un valor de 1.4989 N*m con ayuda de ecuaciones presentadas por HBM y basado en libros de mecánica de fluidos en la medición de la potencia en un aerogerador presentada en la ecuación 11 [8] [9].

$$P = T * \omega \qquad \textbf{11}$$

Donde P es la potencia generada en Watts T es el torque dado en newton por metro y ω es la velocidad angular en radianes por segundo del aerogenerador al reemplazar los datos queda:

$$P = 1.4998(N * m) * 56 \left(\frac{rad}{s}\right)$$
$$P = 83.93\ W$$

Al revisar los datos obtenidos por Pabón Rojas al cual la potencia generada le dio 96.82W se calcula el porcentaje de discrepancia entre los dos valores obtenidos(DV) con la ecuación 12.

$$DV = \frac{(valor\ calculado - Valor\ referencia)}{Valor\ referencia} \qquad \textbf{12}$$

Reemplazando los datos y multiplicándolos por 100 para obtenerlos en porcentaje se tiene:

$$DV = \frac{(83.93 - 96.82)}{96.82} * 100$$

$$DV = \mathbf{-13.31\%}$$

Se puede observar que la potencia generada da 13.31% menor que la calculada por Pabón Rojas [4].

4. CONCLUSIONES

Ansys permite realizar el análisis de la potencia generada de forma más directa ya que permite calcular de forma directa el torque generado por el alabe.

Los valores obtenidos en las simulaciones dependen en gran medida del número de nodos y tamaño de los elementos. Así como, el número de iteraciones por lo que estos datos variaran en función de los perfiles aerodinámicos empleados en la construcción del álabe.

Se debe construir un modelo que permita verificar los datos obtenidos a través de las simulaciones para el perfil aerodinámico construido con los perfiles aerodinámicos de las familias WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042 y de esta manera verificar dichos datos.

RECONOCIMIENTO

Se agradece de manera especial a la Universidad de Pamplona, especialmente a la vicerrectoría de investigaciones. La cual está apoyando el proyecto titulado "DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ALABÉ PARA UN GENERADOR EÓLICO DE BAJAS VELOCIDADES DE VIENTO UTILIZANDO MATERIALES BIOCOMPUESTOS CON FIBRAS NATURALES". Para el cual se están realizando todos los estudios presentes en este artículo.

REFERENCIAS

[1] S. Emeis, Wind Energy Meteorology Atmospheric Physics for Wind Power Generation, cham switzerland: Springer Nature, 2018.

[2] J. S. S. VEGA y D. F. M. RODRÍGUEZ, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE AEROGENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL SOPORTADO POR COJINETES MAGNÉTICOS, BOGOTA: FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 2016.

[3] M. P. Baldomero, «Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas ,* vol. 4, nº 1, pp. 617-623, 2012.

[4] C. L. P. ROJAS, DISEÑO DEL ÁLABE DE UN AEROGENERADOR HORIZONTAL DE BAJA POTENCIA, PAMPLONA: FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA., 2017.

[5] ANSYS, «ANSYS,» ESSS, 15 Agosto 2018. [En línea]. [Último acceso: 25 Agosto 2018].

[6] ENEAGRID, «ENEAGRID GRESCO,» ENEA - Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, 23 01 2009. [En línea]. Available: http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm. [Último acceso: 12 08 2018].

[7] S. Lachance-Barrett y E. Corona, «Cornell University,» Confluence, 11 Julio 2016. [En línea]. Available: https://confluence.cornell.edu/pages/viewpage.action?pageId=262012971. [Último acceso: 7 Agosto 2018].

[8] R. Schicker, «International Product Manager,» *HBM Test and Measurement,* vol. 1, nº 1, pp. 1-5, 2012.

[9] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, MECÁNICA DE FLUIDOS DUNDAMENTOS Y APLICACIONES, CIUDAD DE MEXICO: Mc GRAW HILL, 2006.

[10] H. Huang, T. Sun, G. Zhang, L. Sun y Z. Zong, «Modeling and computation of turbulent slot jet impingement heat transfer using RANS method with special emphasis on the developed SST turbulence model,» *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 126, nº 1, pp. 589-602, 2018.

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE TRIGENERACIÓN-FOTOVOLTAICO INSTALADO EN UN CENTRO COMERCIAL

ENERGY ANALYSIS OF A HYBRID TRIGENERATION-PHOTOVOLTAIC SYSTEM INSTALLED IN A SHOPPING MALL

MSc. Aldo López Vega[*], PhD. Carlos Rubio-Maya[*]
MSc. Víctor M. Ambriz Díaz[*], MSc. Hugo C. Gutiérrez Sánchez[*]

[*] Facultad de Ingeniería Mecánica, GREEN-ER,
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Edificio W CU, Morelia, Michoacán, México.
Teléfono: (+52) 443 322 35 00x1343
E-mail: rmaya@umich.mx

Resumen: En este trabajo se analiza la fase de diseño y la operación de un sistema hibrido de trigeneración-fotovoltaico a través del modelado energético. El caso de estudio es un centro comercial ubicado en la ciudad de Morelia (Michoacán, México), en el cual se registran grandes consumos de energía eléctrica y térmica al año. De manera particular, el estudio consiste en determinar para una configuración de planta de trigeneración dada, si los equipos que conforman el sistema son los adecuados o si existe posibilidad de proponer alguna mejora. El análisis energético indicará la configuración que resulta técnica y económicamente más favorable, es decir, con que equipos y bajo que parámetros operacionales se obtendrán mayores eficiencias globales y menores costos de generación energética. Los resultados obtenidos muestran también las formas óptimas de operación con las cuales el sistema de trigeneración-fotovoltaico cubrirá los requerimientos para lo cual fue diseñado, aprovechando al máximo los recursos energéticos con los cuales estará trabajando.

Palabras clave: Análisis energético, trigeneración, fotovoltaico, sistema hibrido.

Abstract: In this paper, the design and operation of a hybrid photovoltaic-trigeneration system through energy modeling are analyzed. The case study is a shopping mall located in the city of Morelia (Michoacán, Mexico), in which there are large consumption of electric and thermal energy annually. In particular, this study consists in determining, for a given trigeneration plant configuration, if the components that integrate the trigeneration system are adequate or if there is a possibility of proposing any further improvement. The energy analysis will indicate the configuration that is technically and economically more favorable, that is, what components and under what operational parameters will be obtained greater global efficiencies and lower energy production costs. The results obtained also show the optimal operations modes with which the trigeneration-photovoltaic system will cover the energy and thermal requirements defined at the design phase, taking advantage of the energy resources at a maximum and sustainable form.

Keywords: Energy analysis, trigeneration, photovoltaic, hybrid system.

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los sectores económicos de la sociedad, la energía eléctrica y térmica son indispensables para realizar todas las actividades cotidianas que las personas necesitan bajo condiciones de confort. Cuando estas formas de energía son requeridas simultáneamente, se presenta la oportunidad de utilizar sistemas avanzados de energía que permiten un uso más eficiente de los combustibles fósiles y una menor generación de emisiones contaminantes a la atmósfera. La trigeneración o CCHP (Combined Cooling Heating and Power), ha demostrado ser una técnica confiable para una producción eficiente de energía a pequeña y mediana. Además, al usar fuentes renovables es posible crear los llamados sistemas híbridos, los cuales tienen varias ventajas sobre los sistemas de energía convencionales, como lo son: la producción de energía en el sitio de acuerdo a necesidades específicas, alto rendimiento energético global, reducción en el consumo de combustibles fósiles, reducción de emisiones de CO_2 y la reducción de pérdidas por transmisión eléctrica. Asimismo, con la incorporación de este tipo de esquemas de generación de energía, se realiza un esfuerzo para contrarrestar el cambio climático y lograr los objetivos estipulados en el acuerdo de Paris.

Los sistemas híbridos son complejos debido a una gran cantidad de variables que deben considerarse en las fases de diseño y operación. Este hecho tiene una gran influencia en los resultados energéticos, ambientales y económicos, (Cardona y Piacetino, 2004). Dada esta situación, las leyes de la termodinámica se pueden utilizar en el análisis de sistemas de trigeneración para integrar tecnologías de conversión de energía de la manera más eficiente, así como para establecer la estrategia operativa más rentable para lograr todos los beneficios teóricos. Se han llevado a cabo estudios acerca de sistemas híbridos de trigeneración-fotovoltaica desde una perspectiva económica y energética. Un estudio tecno-económico de un sistema hibrido compuesto por un sistema fotovoltaico, una microturbina de gas y un banco de baterías fue presentado en (Ismail et al., 2013). Se desarrollaron modelos termodinámicos utilizando balances de energía y técnicas de optimización. Los autores demuestran que el escenario optimo se obtiene cuando ambas tecnologías son combinadas, resultando en el costo de generación más bajo. Basrawi et al., (2014), se realizó un estudio económico y ambiental de un sistema de trigeneración-fotovoltaica utilizando una microturbina de gas como motor principal. Se encontró que cualquier estrategia operativa puede generar beneficios económicos cuando se elimina el subsidio. Además, se afirma que una estrategia de operación basada en cubrir la demanda de electricidad tiene los mayores beneficios económicos. Por otro lado, Nosrat y Pearce (2011), enfocó su estudio en determinar una estrategia de operación óptima para un sistema híbrido de trigeneración-fotovoltaica mediante la simulación. Se demostró que la eficiencia general aumenta más de 50% cuando se aplica una estrategia de operación óptima a este tipo de sistemas.

La literatura demuestra el rápido desarrollo, los nuevos mercados emergentes y la viabilidad de estos esquemas de generación de energía. Además, a través de un análisis preciso basado en las leyes de la termodinámica, es posible obtener los beneficios teóricos de estos innovadores sistemas de suministro de energía. Por otra parte, al realizar el análisis de sistemas ya instalados es posible obtener información sólida para el proceso de toma de decisiones o para mejorar el diseño y los modos de operación del sistema obteniendo los beneficios máximos. Basado en lo anterior, en este trabajo se presenta el análisis energético de un sistema híbrido de trigeneración-fotovoltaico instalado en un centro comercial (por simplicidad, el término CCHP/PV se utilizará de ahora en adelante para referirse a este sistema). Se desarrollan modelos termodinámicos en base a la primera y segunda ley de la termodinámica y se validan mediante datos experimentales reunidos en el sitio. Los resultados demuestran las ventajas de este tipo de sistemas que operan en el ambiente de transición del contexto energético mexicano. Los modelos obtenidos son útiles porque permiten escalar, dimensionar y modificar la operación y el diseño

de estos sistemas para una instalación real o para ser usados en futuros proyectos CCHP/PV.

2. DESCRIPCION DEL SISTEMA HIBRIDO

La configuración híbrida instalada consiste de una microturbina de 65 kW (Capstone, 2007), tres enfriadores de absorción de 5 TR cada uno (con base NH_3-H_2O) (Robur, 2010), un sistema fotovoltaico de 30 kW de potencia máxima, compuesto de 108 módulos fotovoltaicos de 280 W cada uno (Solartec, 2013) y un inversor CC/CA (Fronius, 2013). El sistema fue diseñado para cubrir parcialmente las cargas eléctricas y térmicas de un centro comercial. Por esta razón, está interconectado con la red eléctrica nacional para cubrir los déficits de electricidad. La microturbina produce energía eléctrica la cual es llevada a la red del centro comercial. Al mismo tiempo, los gases de escape de combustión se conducen a través de un tubo aislado térmicamente a los enfriadores de absorción, activando el ciclo de absorción mediante el calor proveniente de los gases. Una vez que se activa el ciclo de absorción, los enfriadores retiran el calor del agua proveniente de las tuberías del sistema convencional, reduciendo sus temperaturas. Posteriormente el agua fría es enviada al controlador de aire para enfriar el aire suministrado al centro comercial. Una vez que los gases de escape activan el ciclo de refrigeración por absorción son descargados al medio ambiente a una baja temperatura. Por su parte, el sistema fotovoltaico produce energía eléctrica que pasa a través de un inversor antes de ser entregada al centro comercial. La Figura1, muestra la planta híbrida instalada junto a los principales flujos de energía.

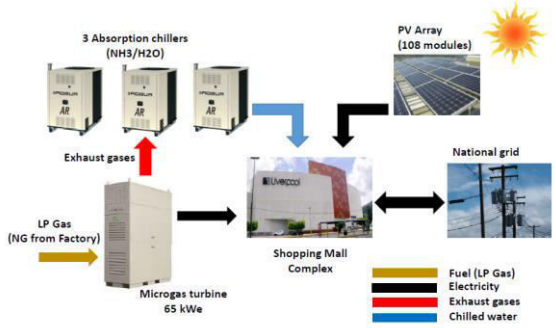


Figura 1. Diagrama general del sistema híbrido.

2.1 Cargas eléctricas y térmicas

La carga eléctrica del centro comercial fue obtenida directamente de los registros hechos por la empresa proveedora de electricidad. Para la carga térmica, se desarrolló una metodología para estimar la demanda térmica que se requiere durante un día común. Se obtuvieron datos precisos acerca la capacidad instalada y patrones de uso del sistema de aire acondicionado convencional. La Figura 2, muestra la variación de la demanda eléctrica y térmica durante un día típico. Existe una tendencia similar a lo largo del año en ambos casos, por lo que estos perfiles eléctricos y térmicos se consideran para el análisis anual del sistema CCHP/PV.

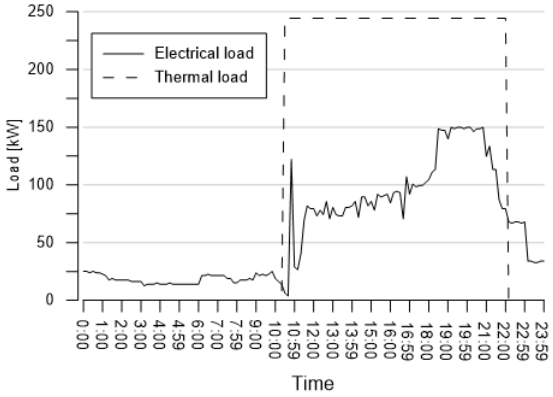


Figura 2. Perfil de cargas térmica y eléctrica.

3. MODELO TERMODINAMICO

3.1 Subsistema CCHP

El sistema de trigeneración se analizó en estado estacionario ya que se espera que la microturbina y los enfriadores de absorción funcionen de manera continua y a su capacidad nominal. Por otra parte, el análisis del sistema fotovoltaico se realizó en estado transitorio con el fin de simular el rendimiento a lo largo del día. El software utilizado para realizar las simulaciones en estado estacionario fue EES (Engineering Equation Solver) mientras que las ecuaciones del estado transitorio fueron resueltas en una hoja de cálculo de Excel. Cada modelo individual fue desarrollado tomando en consideración variables conocidas de varias fuentes: registros recogidos en el sitio, información obtenida de los fabricantes, práctica industrial y datos de trabajos similares disponibles

en la literatura. La Figura 3, muestra el diagrama esquemático del sistema de trigeneración. Se muestran los flujos termodinámicos tomados en cuenta para el análisis. Debe mencionarse que por simplicidad, solo se representa uno de los enfriadores de absorción.

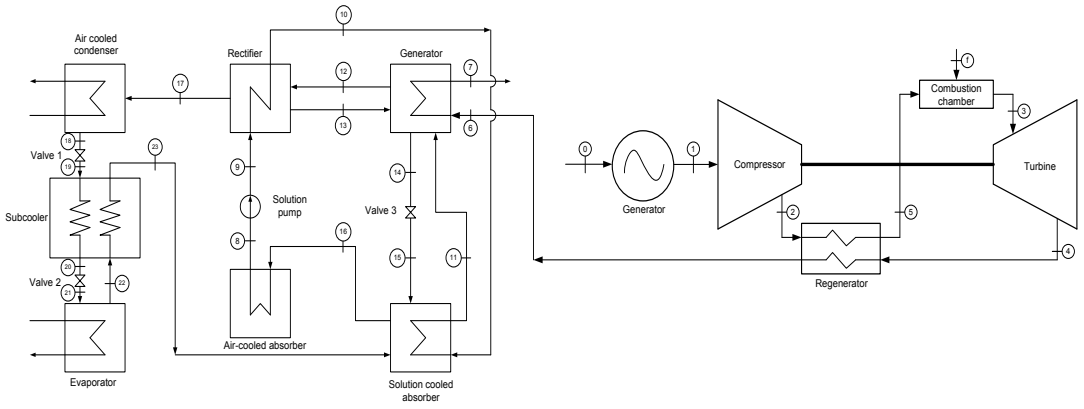


Figura 3. Diagrama esquemático del sistema.

Suposiciones para realizar el modelado.

Para la microturbina:

- Todos los componentes se analizan como un control de volumen en estado estacionario.
- La caída de presión y las pérdidas de calor al medio ambiente se desprecian
- Los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes.
- Se asume que el aire es un gas ideal.
- Los calores específicos del aire son variables.
- La combustión se considera como un proceso de adición de calor a presión constante.

Para los enfriadores de absorción:

- La concentración de vapor refrigerante que deja el rectificador es igual a 0.99.
- Solución en estado de vapor saturado en la parte superior del generador.
- Estado líquido saturado para la solución del rectificador al generador.
- Estado líquido saturado para la solución débil de la salida del generador.
- Sin pérdidas de calor en el rectificador, subenfriador y en el absorbedor enfriado por solución.
- Estado líquido saturado para la salida de solución en el absorbedor enfriado por aire.

Los modelos matemáticos se establecieron aplicando balances de masa y energía (primera ley de la termodinámica), así como la segunda ley de la termodinámica para sistemas abiertos que operan en estado estacionario (Moran, 2003), más detalles se pueden encontrar en (Lopez, 2017). La Ecuación 1 se utiliza para calcular el factor de utilización de energía del sistema de trigeneración (eficiencia de la Primera Ley) (Cengel, 2014), mientras que la Ecuación 2 permite determinar la eficiencia de la Segunda Ley (Kotas, 1995):

$$\eta_{I,CCHP} = \frac{(\dot{W}_n + \dot{Q}_{evap})}{\dot{Q}_{in}} \quad (1)$$

$$\eta_{II,CCHP} = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_f} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,tot}}{\dot{E}_f} \quad (2)$$

3.1 Subsistema PV

El análisis de la celda fotovoltaica está basado en un modelo físico de circuito equivalente el cual involucra un diodo y resistencias en serie y en paralelo (Masteres, 2009). El modelo de energía para el módulo fotovoltaico fue construido considerando un módulo con 72 celdas fotovoltaicas, aplicando el balance de energía, determinando parámetros como la corriente de cortocircuito, la corriente de celda, el voltaje de celda, la potencia ideal, las pérdidas del módulo y la potencia real. El modelo fue resuelto usando datos de una estación meteorológica local usando temperatura ambiente, velocidad del viento y

radiación solar. Para la solución del modelo también se debe considerar que el modelo corresponde a la insolación de un cielo despejado (Masteres, 2009). Se tomaron en cuenta parámetros del diseño del módulo fotovoltaico, así como también las suposiciones para resolver los modelos. En el modelo del sistema fotovoltaico se obtuvo también la exergía de entrada, la exergía del producto y la exergía destruida. Finalmente, la eficiencia por Segunda Ley para el sistema fotovoltaico se obtiene de la Ecuación 3 (Anand et al., 2009):

$$\eta_{II,PV} = \frac{V_{MPP} I_{MPP} - \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right)[h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb})]}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) S_T A} \quad (3)$$

4. RECOPILACION DE DATOS EXPERIMENTALES

Se implementaron pruebas experimentales en la planta híbrida para conocer la potencia total y la eficiencia eléctrica generada por la microturbina, la capacidad de enfriamiento y el COP de los enfriadores de absorción, así como la potencia suministrada por el sistema fotovoltaico. Los datos se registraron en sitio durante varios días bajo diferentes condiciones ambientales, obteniendo información para validar los modelos de energía del presente estudio. Los datos experimentales fueron obtenidos directamente de equipo de medición y otras variables se obtuvieron usando dispositivos de medición externos.

4.1 Adquisición de datos a partir del monitoreo incorporado

La microturbina tiene un hardware y software interno que muestra 191 parámetros en tiempo real. Algunos de ellos: fecha de control y tiempo de control, velocidad del motor, potencia neta generada, temperatura del gas en la salida de la turbina, temperatura del aire en la entrada del compresor, relación aire/combustible, el flujo de masa de aire en la cámara de combustión, energía liberada en la combustión, salida de potencia, etc. Los enfriadores de absorción tienen un panel de control, el cual muestra la temperatura del agua de alimentación en la entrada del evaporador y la temperatura de la alimentación del agua en la salida del evaporador. Finalmente, el inversor tiene un módulo interno el cual permite obtener la energía eléctrica producida por el sistema PV.

4.2 Adquisición de datos a partir de mediciones directas

Para la adquisición de datos a través de fuentes externas, un analizador de calidad de potencia HIOKI 3197 fue usado para obtener el voltaje, la corriente, la frecuencia, la potencia y la energía producida por el sistema. Se utilizó un flujómetro ultrasónico TDS-100H para medir la tasa de flujo. Algunos termopares fueron conectados a un módulo de adquisición de datos Keithley 2700 para registrar la temperatura. Finalmente, se usó una estación meteorológica para registrar la temperatura del ambiente, la velocidad del viento y la radiación solar del sitio en donde se instaló el sistema.

Para el sistema de trigeneración, la medición fue realizada por periodos de dos horas por varios días una vez que los componentes alcanzaron el estado estacionario. La energía suministrada por el combustible, la entrada de temperatura del compresor, la temperatura de los gases de escape, el flujo de la masa de aire, la salida de potencia y la energía producida fueron medidas directamente en el sistema de monitoreo de la turbina. Una vez que los parámetros fueron obtenidos, la eficiencia térmica del sistema fue determinada. En los enfriadores de absorción, fueron medidas las temperaturas del agua de alimentación y el agua de retorno, así como también la tasa de flujo del agua de alimentación. Después se determinó el COP correspondiente de cada máquina de absorción. Finalmente, para el inversor PV, se midió la potencia generada y la energía producida por el sistema fotovoltaico.

5. RESULTADOS

5.1 Validación de modelo

La Figura 4, muestra el rendimiento experimental comparado con los resultados analíticos. Se puede observar en ambos casos que la potencia producida por la microturbina disminuye cuando la temperatura del ambiente aumenta. Los resultados analíticos muestran una disminución más lenta en la salida de potencia con la temperatura ambiente

porque el modelo fue construido utilizando el modelo del gas ideal y no toma en cuenta los efectos de la humedad en el ambiente ni el efecto de la altura sobre el nivel mar (presión atmosférica) en el ciclo.

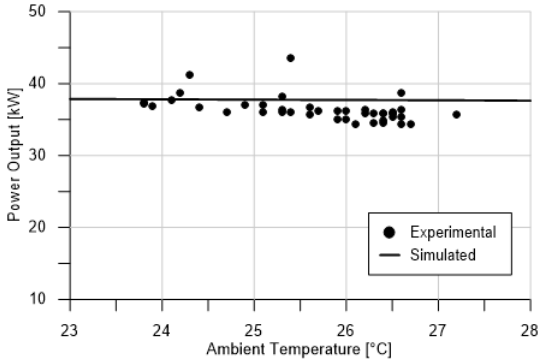


Figura 4. Validación de la microturbina (Potencia vs T_{amb}).

Los resultados con respecto al sistema fotovoltaico reflejan un comportamiento muy similar entre los casos simulados y experimentales. Se puede observar que hay un pequeño retraso en los resultados analíticos porque el modelo utilizado para el cálculo de la radiación solar se basa en las relaciones de geometría esférica, que fijan el centro del sol para sus cálculos. Esto significa que, para el modelo, el amanecer y el anochecer se llevan a cabo cuando el centro del sol se encuentra en el horizonte, mientras que los datos experimentales siguen recibiendo radiación del sol hasta que desaparece completamente del horizonte. Otra variación importante es la presencia de las nubes en el cielo, las cuales no se toman en cuenta por el modelo utilizado. Esta es la razón por la cual no hay puntos dispersos en su curva. Las Figuras 5, muestra el comportamiento para un día común de verano e invierno, respectivamente, teniendo valores similares en su comportamiento a través del tiempo.

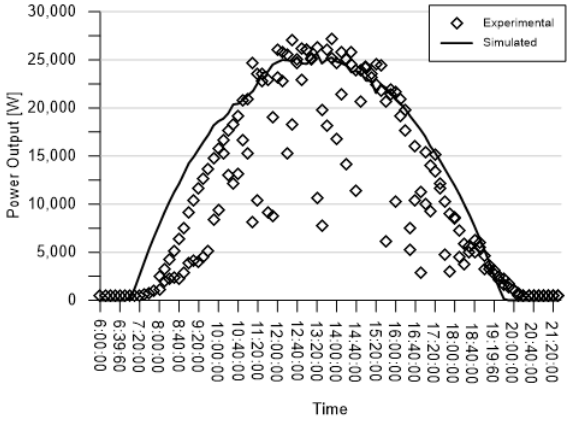


Figura 5. Sistema PV en verano (Potencia vs Tiempo).

5.2 Aplicación del modelo y discusión

5.2.1 Análisis del diseño

La Tabla 1, muestra la distribución la tasa de exergía presentada en la microturbina. La contribución total de exergía proviene del combustible (gas LP), el cual entrega 134.6 kW de energía disponible al sistema. La exergía extraída del sistema mediante la potencia producida en la microturbina es de 37.78 kW, representando un 28.07% del total contribuido. Al mismo tiempo, los gases de escape contienen una exergía de 32.1 kW, la cual es llevada a los enfriadores de absorción para la producción de agua fría. Como se esperaba, la cantidad más grande de exergía destruida se presenta en la cámara de combustión, alcanzando un valor de 36.3 kW, el cual representa 26.97% de la exergía total. Las principales irreversibilidades se deben a la reacción química desarrollada en el proceso de combustión en el que se realiza un intercambio incontrolado de electrones entre los componentes reactivos y la transferencia de calor irreversible entre los gases calientes de la combustión y el aire dentro de la cámara. Por otra mano, 13.1 kW son destruidos en la turbina debido principalmente a la expansión espontanea de gases de combustión a una menor presión de descarga. En tercer lugar, está el generador, el cual presenta una exergía destruida de 10.75 kW. El compresor se posiciona en cuarto lugar, destruyendo 4.57 kW de exergía como resultado de los efectos de la fricción en el fluido y la fricción entre las partes mecánicas en movimiento. Sin embargo, estas pérdidas son menos significantes que aquellas

asociadas con una diferencia de temperatura finita, representando solamente el 3.4% de la exergía total del sistema.

Tabla 1. Contabilidad exergética en la microturbina.

Exergía	Producto	[kW]	[%]
Exergía entrada total	Combustible	134.6	100
Exergía de producto	Potencia neta	37.78	28.0
Pérdida de exergía	Gases de escape	32.1	23.8
Exergía destruida	Cámara combustión	36.3	26.9
	Turbina	13.1	9.73
	Regenerador	10.75	7.99
	Compresor	4.57	3.40

Los enfriadores de absorción tienen varias fuentes de irreversibilidades que se toman en cuenta en el balance de exergía (Tabla 2). Sin embargo, esto representa un menor porcentaje comparado a las irreversibilidades presentadas en los componentes internos de la microturbina. El generador del enfriador de absorción es el componente en donde ocurre la mayor irreversibilidad debido a los procesos de intercambio de calor realizados. Sin embargo, dado que no se maneja un gradiente de temperatura muy alto, se destruye un valor de 0.1502 kW, representando 0.4679% del total. En el absorbedor enfriado por aire y en el condensador, las fuentes principales de irreversibilidad se asocian con la diferencia en la temperatura entre los flujos de aire atmosféricos y el refrigerante, teniendo valores de 0.1469 y 0.023 kW, respectivamente. Ya que la interacción física entre el refrigerante y el absorbedor toma lugar en el rectificador y en el absorbedor enfriado por solución, las irreversibilidades dentro de estos dispositivos toman lugar debido a la mezcla espontanea de sustancias con una diferente composición o condición termodinámica, y a la transferencia de calor y fricción entre fluidos, alcanzando valores de 0.0716 y 0.0449 kW, respectivamente. Las pérdidas en el subenfriador, evaporador y en la bomba de solución claramente son más bajas que las anteriores y representan solamente 0.09% del total contribuido al sistema. Otra parte del análisis se centra especialmente en la exergía de flujo que acompaña a los gases de combustión y deja los enfriadores de absorción a medida que realizan su función dentro de ellos. Esta exergía tiene un valor de 14.41 kW y no es suficiente para activar un cuarto enfriador que se incorpore al sistema. Esto confirma que tres enfriadores fueron seleccionados correctamente en la fase de diseño. Sin embargo, la energía disponible de los gases de combustión puede ser usada en algún uso directo o como agua caliente para el interior del centro comercial. Finalmente, la Tabla 3. muestra los resultados correspondientes a las eficiencias de la primera y segunda ley. Los resultados muestran una eficiencia general de 63.12% para el sistema de trigeneración, lo que representa un aumento de 140% sobre el uso de la microturbina sola. Además, se estima que la eficiencia de la segunda ley es de 51.54%, lo cual indica un buen rendimiento del sistema en relación con el rendimiento bajo condiciones reversibles para los mismos estados. La eficiencia de exergía del sistema fotovoltaico es de 7.4% cuando opera en su punto de máxima potencia.

5.2.1 Análisis de la operación

En el análisis de la operación del sistema, se realizó una simulación del sistema para un día común. De la curva estimada del consumo de electricidad, se realizó el análisis descontando la energía producida por el sistema fotovoltaico, la microturbina y la energía obtenida del uso de los enfriadores y restando el consumo de electricidad del sistema HVAC convencional. Por otro lado, en el análisis económico, se usó el VPN como indicador económico. Se estudiaron seis escenarios diferentes para poder encontrar el que proporcionara los mayores ahorros energéticos y económicos para el contexto energético mexicano. Los tiempos de operación se definieron para cada escenario, como también el tipo de combustible utilizado, ya sea gas LP o gas natural. Los escenarios estudiados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 2. Contabilidad exergética en el chiller de absorción.

Exergía	Producto	[kW]	[%]
Exergía de entrada	Gases combustión microturbina	32.1	100
Exergía producto	Capacidad de enfriamiento	17.1	53.27
Exergía pérdida	Gases combustión salida generador	14.41	44.89
Exergía destruida	Generador	0.150	0.467
	Absorbedor enfriador por aire	0.146	0.457
	Rectificador	0.071	0.223
	Absorbedor enfriador por solución	0.044	0.140
	Condensador	0.023	0.072
	Sub-enfriador	0.011	0.035
	Evaporador	0.001	0.006
	Bomba de solución	5.86E-07	1.82E-06

Tabla 3. Rendimiento de los subsistemas de la planta CCHP/PV.

Subsistema	Parámetro	Valor
Microturbina	Eficiencia	26.21%
Enfriador absorción	COP	0.42
Sistema fotovoltaico	Eficiencia por segunda ley a máxima potencia	7.4%
Sistema de trigeneración	Eficiencia por primera ley	63.12%
	Eficiencia por segunda ley	51.54%

Tabla 4. Definición de escenarios para el estudio.

Escenario	Horario	Combustible
SC1	completo 24 hrs	Gas LP
SC2	10:30-23:00 hrs	Gas LP
SC3	17:00-23:00 hrs	Gas LP
SC4	completo 24 hrs	Gas natural
SC5	10:30-23:00 hrs	Gas natural
SC6	17:00-23:00 hrs	Gas natural

En el escenario 1 (SC1), la microturbina opera continuamente 24 horas al día, mientras que el sistema fotovoltaico continúa con la operación normal. La Tabla 5, muestra los resultados de todos los escenarios, incluyendo el escenario 1. Aquí se puede ver que, en este esquema de operación, 374,242.00 kWh se producen cada año mediante el sistema híbrido, obteniendo ganancias económicas por $ 53,715.74 y tener excedentes eléctricos que se envían a la red eléctrica. Sin embargo, el VPN no presenta condiciones favorables ya que tiene un valor de $ -828,362.66 debido al alto costo del gas LP. En el mismo caso, el sistema fotovoltaico presenta un VPN negativo ($ -10,709.99). Esto se debe las bajas tasas eléctricas para el tipo de contrato actual del centro comercial, además del hecho de que el sistema solamente produce electricidad durante la tarifa media, en donde las tasas eléctricas son más bajas, lo que no tiene un efecto importante en la facturación eléctrica del centro comercial. Finalmente, el sistema de trigeneración solo tiene un VPN de $ -817,652.77 para su gran gasto de combustible, lo cual indica que no es un esquema de operación factible.

Los escenarios SC2 y SC3, los cuales consideran que el sistema híbrido de trigeneración trabaja con horas de operación reducidas. Desde un punto de vista técnico, estos escenarios pueden operar sin inconveniencias, pero considerando el punto de vista económico, los escenarios representan resultados desfavorables. Esto también se puede ver en la Tabla 5, donde se pueden ver resultados similares al SC1. La razón principal para este comportamiento es el alto costo del combustible utilizado y el tiempo de operación que representa beneficios insuficientes para lograr los beneficios económicos, mostrando un VPN negativo para ambos escenarios.

Para el escenario 4 (SC4), la operación del sistema fue simulada usando gas natural como entrada de combustible, el cual tiene un menor costo que el gas LP. Sin embargo, se debe considerar que el gas natural tiene un poder calorífico menor (45,000 kJ/kg), lo que resulta en una menor cantidad de energía eléctrica producida por la microturbina, alcanzando solamente 33.95 kW. La Figura 6, muestra el comportamiento del sistema y se puede ver un excedente eléctrico. En este escenario, el sistema de trigeneración opera 24 horas al día,

produciendo 327,739.22 kWh anualmente, alcanzando un ingreso de $ 40,319.10 por año y un VPN de $ 199,003.08, haciendo del escenario económicamente rentable. Se debe notar que el sistema híbrido solo también es atractivo económicamente, ya que tiene un VPN de $188,293.19. El sistema fotovoltaico presenta el mismo comportamiento que en los escenarios previos, ya que el cambio de combustible no afecta directamente a la generación eléctrica del sistema PV.

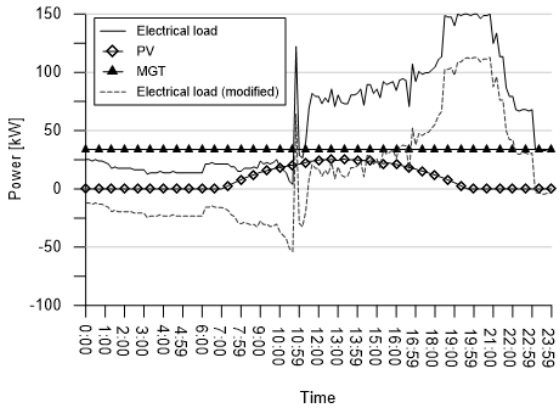


Figura 6. Resultados para el Escenario 4 (SC4).

El comportamiento en el escenario 5 (SC5) considera que el sistema de trigeneración opera de 10:30 a.m. a 11:00 p.m. (similar al SC2) usando gas natural. El sistema híbrido produce 250,213.84 kWh por año mientras que el sistema de trigeneración solo produce 171,780.56 kWh. En ambos casos, el VPN es positivo, con valores de $20,071.64 y $30,781.63, respectivamente. Esto indica que la energía producida por la microturbina es suficiente para causar una reducción considerable de energía comprada de la red y lograr beneficios económicos. En la operación del sistema híbrido, se reflejan los efectos negativos del alto costo del capital del sistema PV, pero a pesar de esto es posible obtener un VPN positivo ($20,071.64). Finalmente, en el escenario 6 (SC6) ningún esquema es rentable debido a las pocas horas de operación propuestas. La Tabla 5, muestra los valores obtenidos para este escenario, así como también aquellos correspondientes al análisis económico para todos los escenarios propuestos.

6. CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se obtuvieron de este estudio:

- Los resultados demostraron la importancia de la Primera y Segunda Ley para analizar sistemas de potencia híbridos. Mediante el análisis de la Segunda Ley, fue posible visualizar los componentes en donde la mayor exergía fue destruida.
- Los modelos, desarrollados y validados mediante la experimentación, probaron ser una herramienta rentable y efectiva para analizar la planta híbrida. Además, fue posible utilizar estos modelos para escalar, redimensionar y modificar la operación y el diseño de estos tipos de sistemas.
- Fue demostrado que el sistema es energética y exergéticamente eficiente y que no es rentable agregar un cuarto enfriador de absorción en el diseño original, ya que el calor disponible no sería suficiente para activar su ciclo. Sin embargo, este calor podría ser explotado por algún uso directo, como agua caliente sanitaria, y por lo tanto aumentar la eficiencia general del sistema.
- Una vez que se han identificado las causas de las irreversibilidades, es posible modificar el diseño del sistema para poder contrarrestar los efectos negativos que estos tienen en el rendimiento del sistema. Sin embargo, cuando se analizan las modificaciones posibles en el diseño, es necesario desarrollar un análisis económico simultáneamente para poder tener información confiable en el momento de toma de decisiones, y por lo tanto lograr que el sistema sea económicamente rentable y energéticamente eficiente.
- Una vez que se han identificado las causas de las irreversibilidades, es posible modificar el diseño del sistema para poder contrarrestar los efectos negativos que estos tienen en el rendimiento del sistema.

Sin embargo, cuando se analizan las modificaciones posibles en el diseño, es necesario desarrollar un análisis económico simultáneamente para poder tener información confiable en el momento de toma de decisiones, y por lo tanto lograr que el sistema sea económicamente rentable y energéticamente eficiente.

Tabla 5. Resultados para todos los escenarios bajo estudio.

SC	Parámetro	Sistema convencional	Sistema Híbrido	Sistema Fotovoltaico	Sistema de Trigeneración
SC1	Costo de inversión [USD]	-	303,846.1	100,000.0	203,846.1
	Energía producida [kWh/a]	-	374,242.0	78,433.2	361,509.5
	Energía adquirida [kWh/a]	522,081.4	82,141.3	443,650.9	160,574.6
	VPN	-	-828,362.6	-10,709.9	-817,652.7
SC2	Costo de inversión [USD]	-	303,846.1	100,000.0	203,846.15
	Energía producida [kWh/a]	-	267,914.1	78,433.2	189,480.8
	Energía adquirida [kWh/a]	522,081.4	254,170.0	443,650.9	341,218.7
	VPN	-	-505,937.1	-10,709.9	-495,227.2
SC3	Costo de inversión [USD]	-	303,846.1	100,000.0	203,846.1
	Energía producida [kWh/a]	-	170,680.5	78,433.2	92,247.2
	Energía adquirida [kWh/a]	522,081.4	351,403.6	443,650.9	429,836.9
	VPN	-	-333,748.5	-10,709.9	-323,038.5
SC4	Costo de inversión [USD]	-	303,846.1	100,000.0	203,846.1
	Energía producida [kWh/a]	-	406,172.5	78,433.2	327,739.2
	Energía adquirida [kWh/a]	522,081.4	115,911.6	443,650.9	194,344.9
	VPN	-	188,293.1	-10,709.9	199,003.0
SC5	Costo de inversión [USD]	-	303,846.1	100,000.0	203,846.1
	Energía producida [kWh/a]	-	250,213.8	78,433.28	171,780.5
	Energía adquirida [kWh/a]	522,081.4	271,870.3	443,650.9	350,303.6
	VPN	-	20,071.6	-10,709.9	30,781.6
SC6	Costo de inversión [USD]	-	303,846.1	100,000.0	203,846.1
	Energía producida [kWh/a]	-	162,063.2	78,433.2	83,630.0
	Energía adquirida [kWh/a]	522,081.40	360,020.8	443,650.9	438,454.1
	VPN	-	-84,122.71	-10,709.9	-73,412.8

- De acuerdo al análisis de la operación del sistema, la estrategia de operación propuesta en el escenario 4 donde el sistema de trigeneración opera solo, es la más apropiada para obtener beneficios económicos del sistema, ya que presenta un VPN positivo, haciéndolo un proyecto rentable además de ser energéticamente eficiente, como ha sido demostrado.

RECONOCIMIENTO

Se agradece el apoyo del programa de Estímulos a la Innovación del CONACYT para realizar la presente investigación. Se reconoce también el apoyo y facilidades brindadas por la UMSNH.

REFERENCIAS

Amir N. y Joshua M. P. (2011). *Dispatch strategy and model for hybrid photovoltaic and trigeneration power systems,* Applied Energy, **Vol. 88**, No 9, 3270-3276.

Anand S. J., Ibrahim D. y Bale V. R. (2009). *Performance analysis of photovoltaic systems: A review,* Renewable and Sustainable Energy Reviews, **Vol. 13**, No 8, 1884-1897.

Capstone Turbine Corporation (2007). *Capstone Microturbine Model C65 User's Manual*, California, USA.

Cardona E. y Piacentino A. (2004). *A validation methodology for a combined heating, cooling and power (CHCP) pilot plant,* Journal of Energy Resources Technology, **Vol. 126**, No 4.

Cengel A.Y. y Boles A.M. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 7th edition, McGraw-Hill, New York.

Firdaus B., Takanobu Y. y Shin'ya O. (2014). *Economic and environmental based operation strategies of a hybrid photovoltaic-microgas turbine trigeneration system,* Applied Energy, **Vol. 121**, 174-183.

Fronius (2013). *Fronius DATCOM Detail. System monitoring*, USA.

Ismail M.S., Moghavvemi, M. y Mahlia, T.M.I. (2013). *Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: Case study of Palestine,* Energy Conversion and Management, **Vol. 75**, 271-281.

Kotas T.J (1995). *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger Publishing Company, FL.

López V.A., Kowalski G.J., Rubio-Maya, C. y Pacheco J.J.I (2017). *Modelling and Validation of a Hybrid Trigeneration/Photovoltaic System Installed in a Shopping Mall Complex*, Energy ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 3-9, Tampa, Florida, USA.

Masters, G. M (2009). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Second edition, Wiley, New Jersey.

Moran M.J. y Shapiro H.N (2003). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 4th edition, John Wiley & Sons Inc.

Robur (2013). *Installation, use and maintenance manual, GA line ACF 660-00 Model*, USA.

Solartec, Energia Renovable. *270-290 W Solar Panel Datasheet, Model S72MC6*, Salamanca, México.

Cengel A.Y., Boles A.M., Thermodynamics: An Engineering Approach, 7th edition, McGraw-Hill, New York.

ESTUDIO DE DIFERENTES MODELOS DE TURBULENCIA PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN PERFIL NACA 2415 MEDIANTE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS DE FLUIDOS

STUDY OF DIFFERENT TURBULENCE MODELS TO OBTAIN THE CURVES CHARACTERISTICS OF A NACA PROFILE 2415 THROUGH THE THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF FLUID FLOWS

Luis. D. Mendoza [*], **Luis E Vera**[**]

[*] **Universidad Nacional Experimental del Táchira,** Laboratorio de aerodinámica,
Decanato de investigación.
Avenidad Universidad, sector Paramillo. Táchira. San Cristóbal. Venezuela.
Teléfono: +58 276 354022
E-mail: lmendoza@unet.edu.ve
[**] **Universidad Francisco de Paula Santander,** Avenida Gran Colombia Nº 12E-96. Barric
Colsag. San José de Cúcuta. Colombia.
E-mail: luisemiliovd@ufps.edu.co

Resumen Se realizó un análisis computacional, mediante la técnica del CFD, del perfil NACA 2415, con los modelos de turbulencia Realizable K-ε y el modelo de turbulencia K-ω SST para obtener sus curvas aerodinámicas. El software utilizado fue el ANSYS FLUENT V14. La simulación se realizó con mallas no estructuradas y bidimensionales, en un dominio computacional cuyas dimensiones corresponden al túnel de viento AF6109 de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela. Las curvas aerodinámicas se realizaron para diferentes ángulos de ataque, los cuales consistieron en 0º, 4º, 8º, 12º y 16º respectivamente. Las condiciones de borde usadas están basadas en el túnel de viento AF6109. La simulación computacional se validó con las curvas aerodinámicas obtenidas mediante el diseño experimental realizado en el túnel de viento. Se concluye que el modelo de turbulencia K-ω SST predice mejor los gradientes adversos de presión.

Palabras clave Dinámica de fluidos computacional (CFD), perfiles aerodinámicos.

Abstract: A computational analysis was performed, using the CFD technique, of the NACA 2415 profile, with the K-ε Realizable turbulence models and the K-ω SST turbulence model to obtain its aerodynamic curves. The software used was the ANSYS FLUENT V14. The simulation was performed with unstructured and two-dimensional meshes, in a computational domain whose dimensions correspond to the AF6109 wind tunnel of the National Experimental University of Táchira, Venezuela. The aerodynamic curves were made for different angles of attack, which consisted of 0º, 4º, 8º, 12º and 16º respectively. The edge conditions used are based on the AF6109 wind tunnel. The computational simulation was validated with the aerodynamic curves obtained by the experimental design carried out in the wind tunnel. It is concluded that the turbulence model K-ω SST better predicts the adverse pressure gradients.

Keywords: Computational fluid dynamics (CFD), aerodynamic profiles.

1. INTRODUCCIÓN

En la historia de la aviación los nuevos diseños de aeroplanos han experimentado cambios, estos se enfocan en mejorar las características aerodinámicas dependiendo de la función que cumpla la aeronave. Según Boschetti (2006) "el conjunto de mejoras técnicas se traduce en mayor seguridad y menor costo por mayor beneficio". Además, para poder mejorar dichas características los nuevos diseños se basan en la aerodinámica, que; según Romero (1961) "Es la rama de la mecánica de los fluidos que estudia las leyes que regulan los movimientos de los gases, y especialmente del aire, y las fuerzas o reacciones".
Las características aerodinámicas de una aeronave pueden mejorarse al disminuir su resistencia parásita y aumentar la relación sustentación – eficiencia, lo que trae consigo mayor productividad en el sistema. Lo anterior se logra gracias al estudio de los perfiles aerodinámicos. Boschetti (2006) señala que existen varios métodos de evaluación, entre los cuales están: simulación numérica, aproximación teórica, y el estudio de un prototipo en túnel de viento. Además afirma que este último es el más usado por ofrecer mejores resultados en menor tiempo.

Es por esto que la simulación computacional de flujos de fluidos cobra cada día más importancia en la investigación aerodinámica, ya que permite visualizar fenómenos a un nivel que de manera convencional no se observarían. Además ofrece la posibilidad de un laboratorio virtual, el cual conlleva a minimizar los costos de investigación.

El perfil aerodinámico NACA 2415 se usa popularmente en el aeromodelismo a escala 1: 0,25. Mendoza L. (2015), de lo cual surge el interés de realizar un estudio de los modelos de turbulencia Realizable K-ε y el de turbulencia K-ω SST mediante la técnica del CFD, para obtener las curvas aerodinámicas en dicho perfil.
La simulación computacional se validó a su vez con los datos obtenidos en el laboratorio de aerodinámica de la Universidad Nacional Experimental del Táchira. Venezuela.

El diseño experimental consistió en realizar ensayos en el túnel de viento AF6109 con una velocidad del aire de 20 m/s a 25 ºC para diferentes ángulos de ataque (0º, 4º, 8º, 12º y 16º).

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El túnel de viento AF6109 de la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET) es de circuito abierto. La cámara de prueba está hecha de plexiglás, lo que permite visualizar el modelo durante las pruebas de experimentación. Las dimensiones de la cámara son 200 mm de ancho, 500 mm de largo y 300 mm de alto, ver figura 1, por lo cual el modelo de prueba fue fabricado con 200 mm de envergadura y 150 mm de cuerda. Estas dimensiones aseguran que no se produzcan efectos de compresibilidad en la cámara, durante los ensayos experimentales, Cengel y Cimbala (2006). Los modelos de prueba se diseñaron con el software Solid Edge v20 y luego fueron impresos en 3D con plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), ver figura 2.



Fig. 1. Túnel de viento AF6109

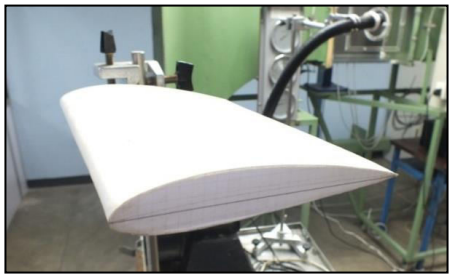


Fig.2. Perfil NACA 2415

Los instrumentos utilizados en el ensayo experimental fueron un anemómetro de molinete Testo 4160, un tubo Pitot conectado a un manómetro de presión diferencial Testo 5128 estableciendo la velocidad del flujo de aire dentro de la cámara de prueba en 20 m/s. Una balanza electrónica BE3S, la cual puede registrar la fuerza de sustentación, la de arrastre y el momento.

3. MODELOS DE TURBULENCIA

3.1 Modelo de turbulencia K-ε

ANSYS (2011) explica que en los modelos de turbulencia de 2 ecuaciones se determinan una longitud turbulenta y una escala de tiempo para la resolución de dos ecuaciones de transporte separadas. El modelo *k-ε* es utilizado en la práctica de ingeniería para el cálculo de flujos en el tiempo. La robustez, la economía y la precisión razonable para una amplia gama de flujos turbulentos explican su popularidad en simulaciones de flujo industrial y transferencia de calor. Es un modelo semi empírico y la derivación de las ecuaciones modelo se basa en consideraciones fenomenológicas y empirismo.

Por otro lado el modelo *k- ε* estándar es un modelo basado en las ecuaciones de transporte modelo para la energía cinética turbulenta (*k*) y la tasa de disipación (*ε*). La ecuación de transporte modelo para *k* es derivada de la ecuación exacta, mientras la ecuación de transporte modelo para *ε* se obtuvo utilizando razonamiento físico y tiene poca semejanza con su contraparte matemáticamente exacta.
En la derivación del modelo *k- ε,* se supone que el flujo es totalmente turbulento, y los efectos de la viscosidad molecular son despreciables. El modelo *k- ε* estándar solo es válido para flujos totalmente turbulentos.

3.2 Modelo de turbulencia Realizable K-ε

El modelo Realizable *k- ε* difiere del modelo *k- ε* estándar en 2 aspectos:

- El modelo Realizable *k- ε* contiene una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta.
- Introduce una ecuación de transporte modificada para la tasa de disipación, ε, la que se deriva de una ecuación exacta para el transporte de la fluctuación y la vorticidad media cuadrada.

El término Realizable significa que el modelo satisface ciertas limitaciones matemáticas sobre los esfuerzos de Reynolds, consistente con la física de flujos turbulentos.

3.2.1 Ecuaciones de transporte para el modelo Realizable *k- ε*

Las ecuaciones de transporte en el modelo *k- ε* realizable son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \quad (1)$$

y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{v\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon \quad (2)$$

Donde:

$$C_1=max\left[0.43\,,\ \frac{\eta}{\eta+5}\right] \quad (3)$$

$$\eta=S\frac{k}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (5)$$

En estas ecuaciones, G_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media.
G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a empuje.
Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa de disipación global.
C_2 y $C_{1\varepsilon}$ son constantes.

σ_k y σ_ε son los números de Prandtl turbulentos para k y ε respectivamente.
S_k y S_ε son términos fuente definidos por el usuario.

3.3 Modelo k − ω estándar

Según ANSYS (2011), los modelos k-ω estandar y SST (shear-stress transport), son similares con ecuaciones de transporte para k y ω. Las formas en que el modelo SST difiere del modelo estándar son:

- Cambio gradual del modelo k-ω en la region interna de la capa límite a una versión numérica a alto número de Reynolds del modelo k-ω en la parte exterior de la capa límite.
- Formulación de viscosidad turbulenta modificada para tener en cuenta los efectos de transporte de los esfuerzos de cizallamiento turbulentos principales.

Además ANSYS (2011), agrega que "el modelo k-ω estándar en ANSYS Fluent está basado en las ecuaciones del modelo k-ω de Wilcox, con modificaciones incorporadas para efectos de bajo número Reynolds, compresibilidad, y dispersión de flujos cortantes. Una de las debilidades del modelo de Wilcox es la sensibilidad de la solución a los valores de k y ω fuera de la capa límite (sensibilidad a la corriente libre), mientras la nueva formulación implementada por ANSYS Fluent reduce esta dependencia, aunque puede tener un efecto significativo en la solución, especialmente para flujos de cizallamiento libre.
El modelo k-ω estándar es un modelo empírico basado en las ecuaciones de transporte modelo para energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación especifica (ω) que también se puede considerar como la relación de ε a k."

3.4 Modelo k - ω SST

ANSYS (2011), explica que "este modelo ha sido desarrollado por Menter, para combinar la precisión del modelo k-ω en la region cercana a la pared con la independencia de corriente libre del modelo k-ε en el campo lejano. Para lograr esto, el modelo k-ε es convertido a formulación k-ω, el modelo k-ω SST es similar al modelo k-ω estandar, pero incluye las siguientes mejoras.

- El modelo k-ω estandar y el modelo k-ε transformado son multiplicados por una función de mezcla y son sumados juntos. La función de mezcla está diseñada para ser una en la región cercana a la pared, que activa el modelo k-ω estándar, y cero lejos de la superficie, que activa el modelo k-ε transformado.
- El modelo SST incorpora un término derivado de difusión cruzada amortiguado en la ecuación de ω.
- La definición de la viscosidad turbulenta se modifica para tener en cuenta el transporte de los esfuerzos de corte turbulentos.
- Las constantes del modelo son diferentes.

El modelo k-ω SST es más confiable y preciso para diferentes clases de flujo como gradientes adversos de presión, perfiles aerodinámicos, ondas de choque transónicas, que el modelok-ω estandar".
.

3.4.1 Ecuaciones de transporte para el modelo k-ω SST.

El modelo k-ω SST tiene una forma similar al modelo k-ω estandar.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-Y_k+S_k \quad (6)$$

y

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \quad (7)$$

En estas ecuaciones, el término G_k representa la producción de energía cinética turbulenta, y es definido de manera similar en el modelo k-ω estandar. G_ω representa la generación de ω, calculada como se describe en el modelo k-ω estandar. Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de k y ω respectivamente. Y_k y Y_ω representan la disipación de k y ω debido a la turbulencia. D_ω representa el término difusión. S_k y S_k son términos fuente definidos por el usuario.

Donde Las difusividades efectivas para el modelo k-ω SST están dadas por:

$$\Gamma_k=\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (8)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (9)$$

Donde σ_k y σ_ω son los números de Prandtl turbulentos para k y ω respectivamente, la viscosidad turbulenta μ_t es calculada de la siguiente manera:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (10)$$

Donde S es la magnitud de la razón de deformación y

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}} \quad (11)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (12)$$

las funciones de mezcla, F_1 Y F_2 estan dadas por:

$$F_1 = \tanh \phi_1{}^4 \quad (13)$$

$$\phi_1 = min\left[max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega{}^+ y^2}\right] \quad (14)$$

$$D_\omega{}^+ = max\left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right] \quad (15)$$

$$F_2 = \tanh \phi_2{}^4 \quad (16)$$

$$\phi_2 = max\left[2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right] \quad (17)$$

4. DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO COMPUTACIONAL

Según Bernal y Orrego (2007), plantean que el dominio computacional bidimensional debe tener las siguientes características: “16 veces el ancho de la longitud de la cuerda y 20 veces el largo de la cuerda, después del borde de fuga”.

Por lo tanto se partió de este criterio para realizar el dominio computacional bidimensional, según las dimensiones de la cuerda del perfil aerodinámico. En la figura 3 se muestra el dominio computacional para un ángulo de ataque de 0º. Cabe destacar que que se usó este mismo criterio para los demás ángulos de ataque.



Fig.3. Dominio computacional

La figura 4 muestra un acercamiento del perfil aerodinámico, así como la malla no estructurada cuya densidad determinó la independencia de la variable de control, la cual se tomó como el coeficiente de sustentación C_L. Bernal y Orrego (2007).

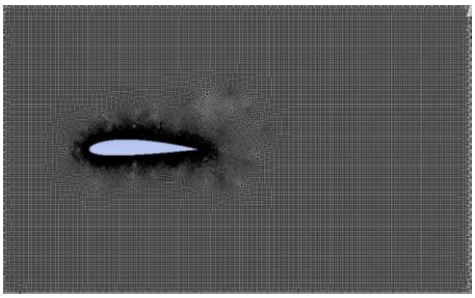


Fig.4. Malla no estructurada

5. CONDICIONES DE BORDE

Las condiciones de borde establecidas para cada solución numérica consistieron:

a) Velocidad de entrada (velocity-inlet): totalmente en la componente “x” e igual a 20 m/s.
b) Intensidad de turbulencia: 1,3%; según lo utilizado por L Velázquez-Araque et. al. (2012)

c) Presión de salida (pressure-outlet): 0 pascales
d) Condición de simetría en la parte superior e inferior del dominio computacional
e) Modelo de turbulencia: Realizable k-épsilon y k-ω SST respectivamente.
f) Fluido de trabajo: Aire a 25 ºC.
g) Algoritmo de solución: SIMPLE (López y Rivadulla, 2008)
h) Criterio de convergencia: RMS: $1x10^{-5}$

Además según White F. (2004) "Para flujos a baja velocidad, con una rugosidad determinada, el coeficiente de sustentación C_L y el coeficiente de arrastre C_D dependen del ángulo de ataque y del número de Reynolds. Este número de Reynolds debe estar en función de la longitud de la cuerda".
Por lo que:

$$Re = \frac{Vc}{\vartheta} \qquad (18)$$

Donde V es la velocidad, c es la longitud de la cuerda y ϑ es la viscosidad cinemática.
Por lo tanto, para esta condición se tiene que:
V= 20 m/s
c= 15 cm = 0,15 m.
ϑ= 1,516 $x10^{-5}$ m^2/s @ T=25 ºC
Re= $2x10^5$

6. RESULTADOS

Una vez realizado el estudio sistemático del refinamiento de la malla, para cada ángulo de ataque, con los distintos modelos de turbulencia para cada simulación; el cual consistió en evaluar la independencia de la variable de control con la densidad de la malla, se obtuvieron los siguientes resultados:

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos de los coeficientes de sustentación, arrastre y de momento, para cada ángulo de ataque utilizando el modelo de turbulencia Realizable k-ε en la simulación numérica.

Tabla 1: Resultados computacionales del perfil NACA 2415 con el modelo de turbulencia Realizable k-épsilon

Ángulo de ataque	C_L	C_D	C_M
0º	0.18883	0.019036	0.088132
4º	0.59187	0.0215108	0.182991
8º	0.965964	0.0282532	0.269873
12º	1.24323	0.0438872	0.324090
16º	1.3586	0.071078	0.33968

De igual manera la tabla 2 muestra los resultados obtenidos en la simulación numeríca empleando el modelo de turbulencia k-ω SST

Tabla 2: Resultados computacionales del perfil NACA 2415 con el modelo de turbulencia k-ω SST

Ángulo de ataque	C_L	C_D	C_M
0º	0.16795	0.020217	0.078910
4º	0.54438	0.022609	0.16413
8º	0.88146	0.030524	0.23828
12º	1.0613	0.054302	0.27261
16º	1.0642	0.10487	0.28588

Los resultados obtenidos con las simulaciones computacionales, fueron validados utilizando los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio de aerodinámica de la UNET. También se utilizaron los resultados del resumen (sumario) de datos de perfiles aerodinámicos de baja velocidad. Selig et. al.,1996. y de la página web airfoiltools.

A continuación la figura 5 muestra. Como el coeficiente de sustentación C_L va aumentando a medida que se incrementa el ángulo de ataque. Nótese que las tendencias de las curvas obtenidas con las simulaciones, así como la curva teórica, según Selig y la experiemntal son semejantes entre sí, por lo que se puede inferir que la simulación computacional queda validada.

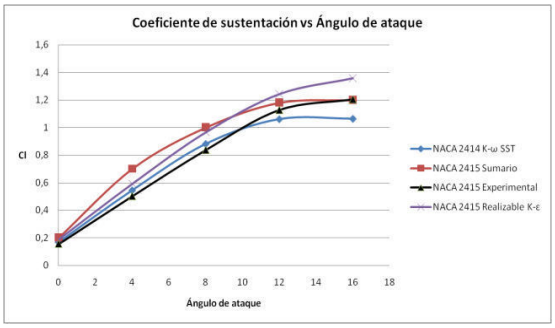


Fig.5. Coeficiente de sustentación vs Ángulo de ataque del perfil NACA 2415

La figura 6 muestra el compotamiento del coeficiente de arrastre C_D con respecto al ánguo de ataque.
Como se puede observar en la figura, la curva experimental se aleja un poco de la tendencia de las curvas obtenidas con las simulaciones numéricas; así como la obtenida con los datos extraidos de la página web airfoiltools. Esto se debe a que el perfil NACA 2415 utilizado en el tunél de viento AF6109 tiene cierta rugosidad. Auque el perfil aerodinámico fue tratado con resina y pintura para disminuir la rugosidad, se evidencia la existencia de la misma.

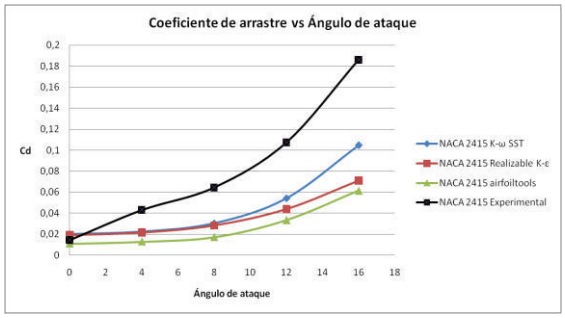


Fig.6. Coeficiente de arrastre vs Ángulo de ataque del perfil NACA 2415

La figura 7 muestra el diagrama polar del perfil NACA 2415, como se puede notar las tendencias son semejantes por lo que se infiere que las simulaciones computancionales se validan con los datos experimentales, así como con los datos extraidos de la bibliografía consutada.

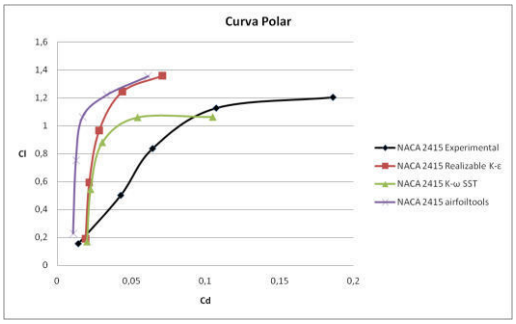


Fig.7. Diagrama Polar del perfil NACA 2415

La figura 8a muestra los contornos de presión obtenidos con la simulación computacional basada en el modelo de turbulencia Realizable k-ε, la secuencia de imagénes corresponden a los ángulos de ataque de 0º, 4º y 8º respectivamente.

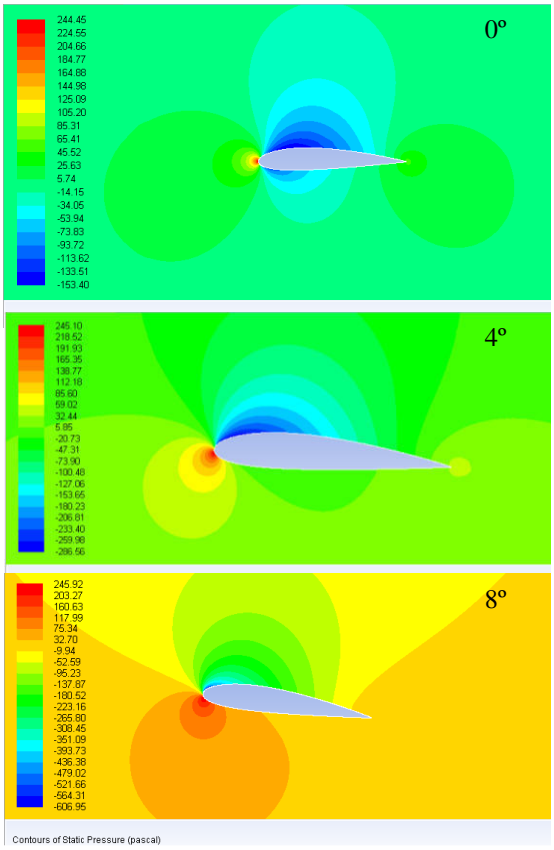


Fig.8a. Contornos de presión

En la figura 8b se observa los contornos de presión para los ángulos de ataque 12º y 16º respectivamente

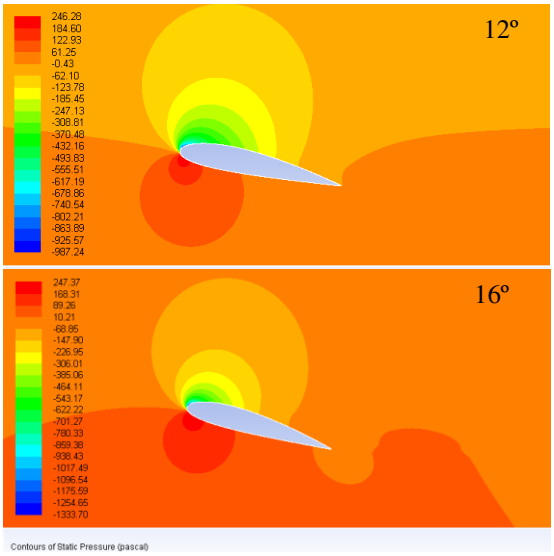


Fig.8b. Contornos de presión

Aunque la solución numérica empleando el modelo de turbulencia Realizable k-ε es aceptable, como se observa en la figura 8, la solución numérica empleando el modelo de turbulencia k-ω SST predice mejor los gradientes abversos de presión, tal y como lo evidencia las curvas aerodinámicas obtenidas en la presente investigación.

7. CONCLUSIONES

Las simulaciones fueron realizadas con los modelos de turbulencia Realizable k-ε y el K-ω SST, dando como resultado que el modelo que mejor predice el gradiente adverso de presión es el modelo K-ω SST, tal y como lo plantea la bibliografía consultada.

REFERENCIAS

ANSYS, INC. (2011). *ANSYS Fluent theory guide*. ANSYS FLUENT 14.0.

Bernal, A. y Orrego, S. (2007). *Diseño del ala para un vehículo aéreo no tripulado*. Trabajo de investigación para optar a Ingeniero Mecánico. Universidad EAFIT. Medellín.

Boschetti P. (2006) *Reducción de resistencia aerodinámica en el avión no tripulado de conservación ecológica*. Universidad Simón Bolívar. Decanato de estudios de Postgrado. Maestría en Ingeniería Mecánica. Venezuela.

Çengel Y y Cimbala J (2006) *Mecánica de fluidos, fundamemtos y aplicaciones*. McGraw-Hill. México.

White F. (2004) *Mecánica de fluidos*, McGraw-Hill. Quinta edición.

Lopez-Rivadulla M, (2008) *Análisis cfd de un flap gurney instalado en perfiles naca*. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Madrid. España.

Mendoza, L. (2015). *Estudio y validación experimental del efecto de aire interno en un perfil aerodinámico hueco*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España.

Selig et. al., (1996) *Summary of low-speed airfoil data*. Department of Aeronautical and Astronautical Engineering University of fllinois at Urbana-Champaign. Volumen 2.

L. Velázquez-Araque and Nožička J. (2012) *Computational simulation of the flow past an airfoil for an unmanned aerial vehicle*. 5th International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation: IMETI 2012.

SITIOS WEB

AirfoilTools http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n2415-il [Consulta el 20 Marzo de 2015]

Testo, Inc https://www.testo.com [Consulta:14 junio de 2016]

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN HORNOS DE ALTA TEMPERATURA

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE ON HEAT TRANSFER IN HIGH TEMPERATURE FURNACES

Yefferson López Zuluaga, Ing. Alex M. García Vergara, MSc. Andrés A. Amell Arrieta

Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE).
Calle 67 N° 53 - 108, Medellín, Colombia. +57 (4) 2198545.

E-mail: yefferson.lopez@udea.edu.co, alex.garciav@udea.edu.co & andres.amell@udea.edu.co

Resumen: En este trabajo se evalúa mediante simulaciones CFD un horno de calentamiento con el objetivo de estudiar el efecto que tiene la presión atmosférica sobre la trasferencia de calor hacia la carga. El sistema fue evaluado para las presiones del nivel del mar y de la ciudad de Bogotá. Los flujos másicos de aire y combustible fueron corregidos para mantener la potencia y el factor de aireación igual para los dos casos, debido a que estos varían con la presión. Se encontró que el calentamiento de la carga se afectó poco por el cambio en la presión, sin embargo, la forma en que fluye el calor hacía la carga si varia, teniendo que la radiación de los gases aporta un 34% de la energía total que llega a la carga a una presión de 1 atm, mientras que a una presión de 0.74 atm, pasa a aportar un 24%.

Palabras clave: Hornos de calentamiento, transferencia de calor, radiación, presión atmosférica, dinámica de fluidos computacional (CFD).

Abstract: In this paper, a reheating furnace was evaluated by mean of CFD simulations in order to study the effect of atmospheric pressure on the heat transfer to the load. The system was evaluated for the pressures of the sea level and the city of Bogotá. The mass flow rate of air and fuel were corrected to keep the thermal input and the air/fuel ratio equal for both cases, due to the change of these parameters with the pressure. It was found that the heating of the load was little affected by the pressure change, however, the way in which the heat flows through the load is affected, taking into account that the combustion gases transfer energy by radiation contributes 34% of the total energy that reaches the load at a pressure of 1 atm, while at a pressure of 0.74 atm, it passes to contribute 24%.

Keywords: Reheating furnaces, heat transfer, radiation, atmospheric pressure, computational fluid dynamics (CFD).

1. INTRODUCCIÓN

La energía térmica representa una parte importante de la demanda energética en Colombia. Pese a que en el país gran parte de la energía eléctrica se abastece con fuentes hidráulicas, el sector industrial es un gran consumidor de energía térmica proveniente de la combustión de combustibles fósiles (UPME, 2010). El sector metal-mecánico se destaca por ser uno de los mayores consumidores de energía térmica dentro del sector industrial. Sus altos consumos se deben a

los numerosos procesos de alta temperatura involucrados en la producción de piezas metálicas (Baukal Jr, 2000), por lo que estudiar los fenómenos involucrados en la operación de los hornos usados en estos procesos, resulta importante para poder realizar diseños que permitan una alta eficiencia energética, bajas emisiones contaminantes y una mejor calidad de producción.

La presión atmosférica tiene un efecto significativo sobre varios aspectos del proceso de combustión. La velocidad de combustión laminar (S_L) es un parámetro característico del proceso de combustión, definido como la velocidad a la que se propaga el frente de llama hacia la mezcla de gases sin quemar. En la literatura se pueden encontrar varios trabajos en los que se estudia S_L a condiciones sub-atmosféricas. En estos se ha encontrado que el orden global de la reacción (n) es el parámetro responsable de la dependencia de S_L con la presión (P). Esta relación puede ser expresada como $S_L \sim (P)^{\beta}$, donde $\beta = (n/2)-1$ (Egolfopoulos y Law, 1991). Esto significa que la presión disminuye la velocidad de combustión laminar cuando el orden global de la reacción es $n < 2$ y lo contrario cuando es $n > 2$. El valor de n depende de la mezcla combustible-oxidante. (Egolfopoulos y Law, 1990) hicieron midiciones de S_L para mezclas CH_4- aire a diferentes presiones. Para todas las mezclas estudiadas n fue menor a 2 por lo que S_L siempre disminuyó al aumentar la presión. El efecto de la presión fue mayor en el rango sub-atmosférico, obteniendo una disminución en el valor de S_L de 27% al pasar de 0.5 atm a 1 atm, para el caso estequimétrico. Por otro lado, (Burbano *et al.*, 2011) estudiaron mezclas $H_2/CO/N_2/CO_2$-aire para las que S_L aumentó al aumentar la presión, excepto para mezclas pobres y muy ricas en las que el comportamiento fue contrario. La forma en que varía S_L con la presión tiene un efecto sobre la morfología de la llama. Como reporta (Amell, 2007) la altura del cono azul en una llama de premezcla de gas natural aumenta al diminuir la presión atmosférica, debido a que la velocidad de flujo crece más de lo que crece la velocidad de combustión. Para el caso de llamas no premezcladas, el trabajo de (Zeng *et al.*, 2013) muestra como para el caso de un jet de CH_4 en aire, la altura de la llama resultante es prácticamente independiente de la presión atmosférica, sin embargo, a menor presión la sección amarilla de la llama no premezclada disminuye y a su vez la radiación que esta emite, debido al efecto positivo de la presión sobre la formación de hollín.

En Colombia, como en otros países de Latinoamérica, algunas de las ciudades más importantes se encuentran localizadas a grandes alturas sobre el nivel del mar, como es el caso de Medellín a 1550 m.s.n.m o Bogotá a 2600 m.s.n.m. No obstante, la mayoría de los estudios y desarrollos tecnológicos en el área de la combustión y calentamiento se hacen en centros de investigación ubicados en ciudades al nivel del mar; por lo que comúnmente no se consideran los efectos de variaciones en la presión atmosférica sobre su operación. En este trabajo se avalúa el efecto de la presión atmosférica sobre un horno de calentamiento, analizando la transferencia de calor hacia la carga. Se realizaron simulaciones CFD con las que se describe el proceso al interior del horno y se compararon los resultados correspondientes a la condición de presión de la ciudad de Bogotá con los resultados obtenidos al nivel del mar.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para este estudio, se tiene un horno de calentamiento de vigas caminantes, utilizado para el calentamiento de palanquillas en un proceso de templado. En la Fig. 1 se muestra un esquema del volumen al interior del horno, el cual se divide en dos zonas: una zona inicial donde se da el pre-calentamiento de las piezas (zona 1) y una zona donde las piezas se terminan de calentar hasta una temperatura alrededor de 1210 K (zona 2). La palanquilla (carga) tiene una longitud y espesor de 150 cm y 1.1 cm, respectivamente y se desplazan por el interior del horno mediante un movimiento intermitente de un paso cada 24 s a una velocidad media de 2.7 mm/s, correspondiente a una producción de 1.27 toneladas por hora (0.353 kg/s).

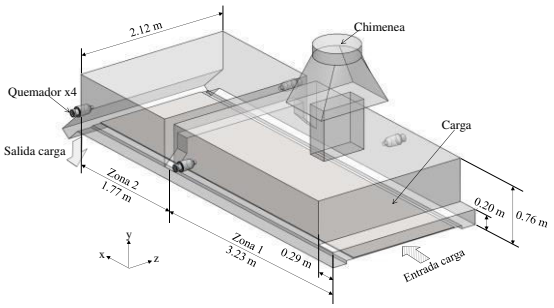


Fig. 1. Volumen interior del horno de calentamiento de vigas caminantes.

El horno opera con cuatro quemadores de alta velocidad marca Fives North American-Standar Tempest 4442 (Davies, 1972; fives north american, 2006), los cuales se encuentran en las caras laterales a una altura de 0.36 m de la base del horno y perpendiculares a la dirección de movimiento de la carga. Los cuatro quemadores están distribuidos en el horno de forma escalonada, dos en cada zona, a una distancia de la entrada de la carga de 1.82 m, 2.74 m, 3.88 m y 4.81 m.

El combustible utilizado es gas natural de Cusiana, cuya composición en volumen es: 82.8% CH_4, 10.0% C_2H_6, 3.6% C_3H_8, 1.2% $>C_3$, 1.9% CO_2 y 0.5% N_2. El poder calorífico superior del combustible a condiciones estándar es de 41153.0 kJ/m^3 y el volumen de aire estequiométrico es de 10.45 m^3_a/m^3_f. Para las condiciones de carga descritas, el horno opera con una potencia total de 670 kW en base al PCS, distribuida en los cuatro quemadores. La potencia en la zona 1 es 57% de la potencia total y el restante corresponde a la zona 2. Los quemadores operan con un factor de aireación de 1.25.
Actualmente la chimenea del horno se encuentra cerrada, por cuestión de estabilidad de la combustión en los quemadores. Debido a esto, los gases de combustión salen del horno por las aperturas para la entrada y salida de la carga. Las paredes y el techo están aislados con un espesor de 24 cm de manta cerámica, mientras que el suelo tiene un espesor de 34 cm de ladrillo refractario. Las propiedades del material aislante se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del aislamiento a 1273 K

		Manta cerámica	**Ladrillo refractario**
Densidad	[kg/m^3]	128	2230
Calor especifico	[J/kg K]	1130	960
Conductividad térmica	[W/m K]	0.25	1.66
Emisividad	[-]	0.68	0.75

El horno está instalado en la ciudad de Bogotá, Colombia, donde la temperatura ambiente y la presión atmosférica son de 297.15 K y 746.6 mbar, respectivamente.

3. MODELO NUMÉRICO

Para las simulaciones se utilizó el solucionador de doble precisión basado en la presión del software comercial ANSYS® - Fluent® versión 18.0. La mezcla de gases involucrada en el proceso se modela como un fluido Newtoniano, incompresible y que fluye en estado estable, por lo que su fluidodinámica se puede describir por las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas con base al Reynolds (RANS). Los cambios en la densidad debido a la temperatura se tienen en cuenta siguiendo la ley de gases ideales. Para el acople presión-velocidad y para la interpolación de la presión se usan los algoritmos *Couple* y *PRESTO!*, respectivamente (ANSYS Inc., 2017). La turbulencia se modeló con el modelo k-ε realizable (Shih *et al*., 1995) y para el cálculo del flujo en la región viscosa de la capa límite en la cercanía de las paredes se usa el método *Enhanced Wall treatment* (EWT) (ANSYS Inc., 2017) en combinación con el modelo k-ε realizable, teniendo en cuenta los efectos térmicos. La combustión se modeló con el *Steady Diffusion Flamelet model* (Peters, 1984), usando el mecanismo cinético *UC San Diego* (University of California at San Diego, 2016). El calor específico de la mezcla de gases se calcula siguiendo la ley de mezclado, mientras que la viscosidad y la conductividad térmica se definieron como función de la temperatura usando dos polinomios de primer grado ajustados a partir de las propiedades de una composición de gases de combustión típica usando la teoría cinética de gases. La radiación se modeló con el *Discrete Ordinates model* (Raithby y Chui, 1990), junto con el *weighted-sum-of-grey-gases model* con los coeficientes de (Smith *et al.,* 1982) para el cálculo del coeficiente de absorción de los gases. Este conjunto de modelos han mostrado tener una muy buena capacidad para predecir el proceso de calentamiento en hornos de vigas caminantes (García y Amell, 2018; Han *et al.,* 2010; Prieler *et al*., 2016).

Para modelar el movimiento y calentamiento de la carga al interior del horno se usó la estrategia propuesta por (Huang *et al*., 2008), debido a su fácil implementación y su buena relación precisión/costo-computacional. Esta estrategia se basa en modelar la carga como una lámina continua que atraviesa el horno, por la cual fluye un fluido de muy alta viscosidad (10^6 kg/m s) con las propiedades termo-físicas del material de la carga. Esta estrategia permite simular el calentamiento de la carga como un proceso estacionario. El material de la carga es acero de medio carbono (0.49C - 0.8Cr [wt-%]). El calor específico y la conductividad térmica del material se definieron en función de la temperatura, debido al efecto de ésta sobre estas propiedades, como se muestra en la Fig. 2. Para la emisividad de la superficie fue de 0.85, ya que este es el valor promedio alrededor del cual varia la emisividad del acero al cromo debido a la temperatura y la oxidación. (Touloukian y DeWitt, 1989)

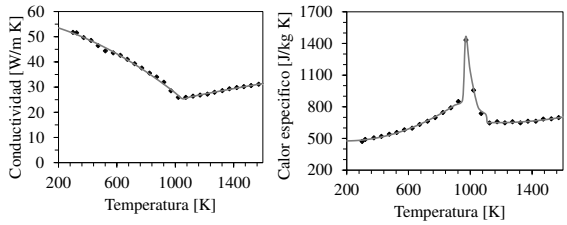


Fig. 2. Conductividad térmica y calor específico de la carga en función de la temperatura (British Iron and Steel Research Association, 1953).

Para considerar las pérdidas de energía a través de las paredes y el suelo del horno, estas se modelan mediante la ecuación de conducción en una dimensión, teniendo en cuenta el espesor de las paredes y las propiedades del material aislante (Tabla 1). Las paredes externas del horno tienen una emisividad de 0.5 y el coeficiente de transferencia de calor por convección natural se calculó mediante las correlaciones del número Nusselt propuestas por (Churchill y Chu, 1975; Lloyd y Moran, 1974).

3.1 Mallado

El mallado usado para realizar las simulaciones numéricas fue construido por medio del software Icem CFD, el cual se muestra en la Fig. 3. El dominio de interés para la simulación, comprende el volumen al interior del horno donde pueden fluir los gases de combustión, el volumen correspondiente a la carga y dos volúmenes de aire a la entrada y salida del horno. El mallado utilizado para las simulaciones tiene cerca de 990000 elementos, para el cual se hizo un análisis de independencia del mallado, comparando los resultados con los de otros dos mallados de 560000 y 1950000 elementos.

4. RESULTADOS

Los efectos de la presión atmosférica sobre la operación de un horno de calentamiento se pueden separar en dos tipos. El primero son los efectos sobre el desempeño de los sistemas auxiliares, es decir, los componentes que interviene en la operación del horno. Estos efectos se manifiestan antes de la entrada al horno. El segundo tipo corresponde a los efectos sobre la fluidodinámica, la combustión y la transferencia de calor al interior del horno.

Los componentes que se afectan por la presión atmosférica son: el ventilador que suministra el aire de combustión y el sistema de suministro de combustible. Para el caso del flujo de aire, un ventilador que trabajando a un régimen de giro constante suministra el mismo caudal sin importar la presión atmosférica, no obstante, a menor presión menor densidad del aire y por lo tanto, menor flujo másico suministrado por el ventilador. Por otro lado, el flujo másico de combustible inyectado por una boquilla es función de la densidad del gas y la presión manométrica a la que se haga la inyección. A menor densidad del combustible debido a una disminución en la presión atmosférica se obtiene una disminución en el flujo másico inyectado por la boquilla y por lo tanto de la potencia suministrada por el quemador. Los flujos másicos de aire y combustible están dados por las Ecuaciones **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.**, respectivamente. Donde Q es el caudal suministrado por el ventilador, C y A son el coeficiente de descarga y el área del inyector de combustible, p es la presión manométrica con la que se inyecta el combustible y ρ_a y ρ_g son la densidad del aire y el combustible.

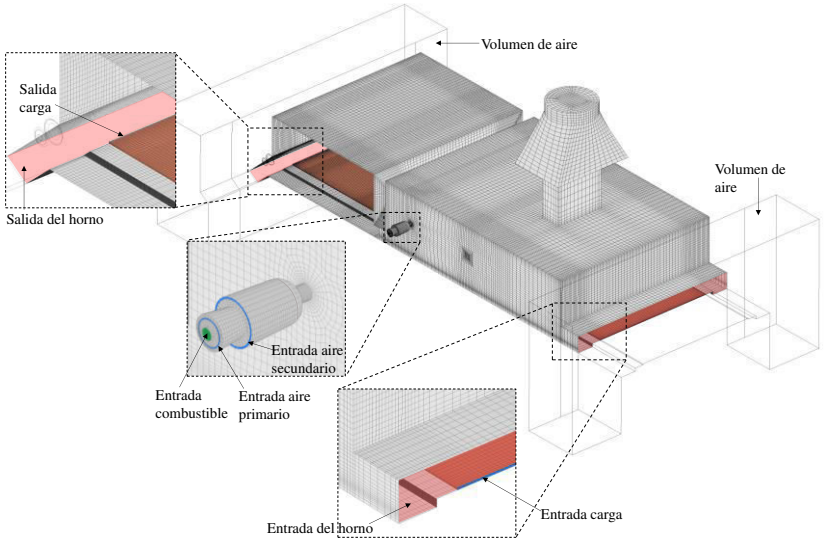


Fig. 3. Ejemplo del mallado realizado para las simulaciones numéricas.

$$\dot{m}_a = Q \cdot \rho_a = Q \cdot \frac{M_a\, P_{atm}}{R\, T} \qquad (1)$$

$$\dot{m}_g = C\, A \sqrt{2 \cdot p \cdot \rho_g} = C\, A \sqrt{2 \cdot p \cdot \frac{M_g\,(P_{atm} + p)}{R\, T}} \qquad (2)$$

Al analizar las dos ecuaciones se observa que mientras el flujo de aire es directamente proporcional a la presión atmosférica, el flujo de combustible es proporcional a la raíz cuadrada de la suma entre la presión atmosférica y la presión manométrica

Debido a esto, al variar la presión atmosférica, el flujo de aire de combustión se va a ver más afectado que el flujo de combustible. Esto hace que además de la caída en la potencia, también haya una reducción en el factor de aireación. En la Fig. 4 se muestra como es la variación de la presión atmosférica con la altura sobre el nivel del mar para tres temperaturas ambiente. Con estas presiones se calculó cuanto varían los flujos másicos de aire y combustible y el factor de aireación respecto a las condiciones al nivel del mar (1 atm).

En la Fig. 4(b) se observa como al pasar del nivel del mar a la altura de Bogotá (0.74 atm), sin hacer ninguna modificación sobre el sistema, los flujos másicos de aire y combustible se reducen en 26% y 14%, respectivamente. Lo que implica, por un lado, una reducción de más del 10% en la potencia de operación del horno, lo que conlleva a una reducción del calentamiento de la carga al haber menos energía disponible. Por otro lado, al disminuir el flujo de aire más que el de combustible, se modifica también la tasa de aireación con la que se da la combustión, tendiendo a mezclas más ricas disminuye la presión. La reducción de la tasa de aireación ocasiona problemas en la combustión, especialmente los asociados a combustión incompleta que impactan de forma negativa tanto la eficiencia como las emisiones contaminantes.

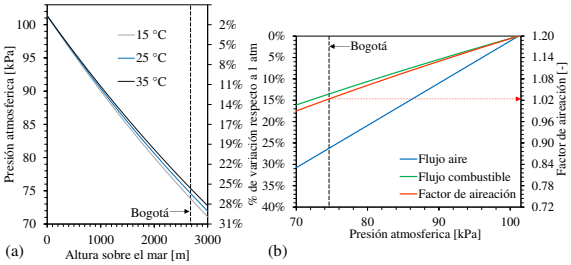


Fig. 4. (a) Variación de la presión con la altura sobre el nivel del mar (b) Variación del flujo másico de aire, de combustible y del factor de aireación con la presión atmosférica (p = 4 kPa).

Los efectos sobre los sistemas auxiliares pueden ser evitados al hacer correcciones sobre el sistema. Para el flujo de aire se puede aumentar la velocidad de rotación del ventilador que suministra el aire de combustión. Para el flujo de combustible se puede

aumentar la presión manométrica con la que se inyecta el combustible o aumentar el diámetro de descarga del combustible. Para las simulaciones numéricas se consideró que al variar la presión atmosférica se hicieron sobre el sistema las modificaciones necesarias para mantener constante los flujos másicos de entrada del aire y el combustible (igual potencia y factor de aireación).
La Fig. 5 muestra los contornos de temperatura en al plano vertical y en el plano horizontal a la altura de los quemadores, para la condición de 0.74 atm. Como se observa en la figura, el proceso de combustión comienza en los quemadores y continua mientras estos son inyectados a alta velocidad al interior del horno, induciendo una succión de flujo másico del gas que rodea al jet debido a la conservación del momento lineal, lo cual genera corrientes de recirculación al interior del horno.

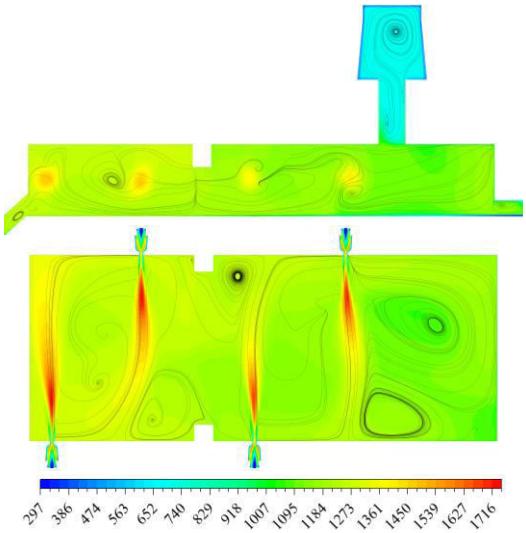


Fig. 5. Contornos de temperatura [K]. 2600 m.s.n.m.

Al disminuir la presión atmosférica, disminuye la densidad de los gases en igual proporción. Para un mismo flujo másico, la disminución en la densidad implica un aumento en la velocidad a la que se inyectan los gases y por lo tanto en el impulso del jet. Una mayor velocidad de flujo promueve una mayor transferencia de calor por convección tanto hacia las paredes del horno como hacia la carga. No obstante, la variación en el flujo de calor por convección hacia la carga no fue muy significativo. Esto se debe a que para procesos de alta temperatura (>800°C) la mayoría de la energía se transfiere por medio de la radiación (Trinks *et al*., 2004).

La Ecuación (3) describe el flujo de energía total a través de la superficie de la carga expuesta al interior del horno, donde q_{Rad} es el flujo neto de energía por radiación y q_{Conv} es el flujo de energía por convección. El flujo neto de energía por radiación es igual a la diferencia entre la porción de la energía incidente que es absorbida por la carga, la cual proviene tanto de las paredes ($Q_{R\,wall}$) como de los gases de combustión ($Q_{R\,gas}$), y la radiación emitida nuevamente por la superficie de la carga ($\epsilon\,\sigma\,T^4$).

$$q_T = q_{Rad} + q_{Conv}$$
$$q_T = \left(Q_{R\,wall} + Q_{R\,gas} - \epsilon\,\sigma_{SB}\,T^4\right) + q_{Conv} \qquad (3)$$

El flujo de calor hacia la carga varía a causa del cambio en la presión atmosférica. El flujo neto de energía por radiación y convección hacia la carga para las dos condiciones de presión atmosférica se presenta en la Fig. 6(a). En la Fig. 6(b) se muestra como es la distribución de los flujos de energía por radiación y convección respecto al flujo total, separando la radiación entre la que proviene de las paredes del horno y la que proviene de los gases, las cuales se calcularon siguiendo la metodología descrita por (García y Amell, 2018).

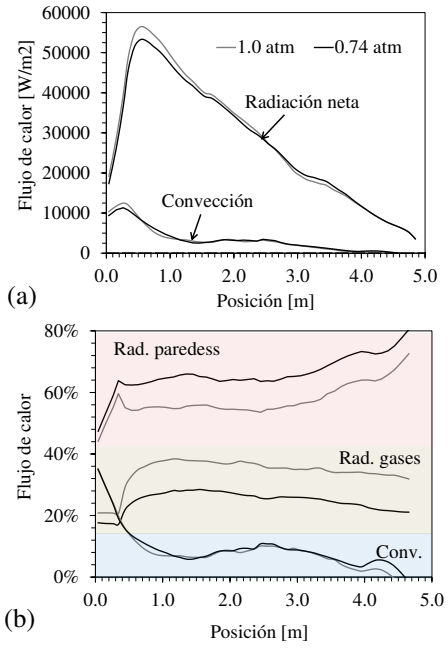


Fig. 6. Flujo de calor hacia la carga: (a) Radiación neta y convección. (b) Distribución del flujo de energía hacia la carga.

El cambio más significativo se da en los flujos de calor por radiación, donde a menor presión atmosférica menor es la radiación proveniente de los gases de combustión y mayor es la proveniente de las paredes. Respecto a la radiación total que incide sobre la carga a 1 atm, la radiación proveniente de los gases se reduce un 11% al pasar a 0.74 atm, mientras que la proveniente de las paredes aumenta un 6%, lo cual conlleva a una reducción de la radiación total de 5% en promedio. Esta reducción se aprecia en la gráfica de la radiación neta al inicio del horno, donde la temperatura de la carga es baja y la radiación emitida por esta es mínima.

Como se observa en la Fig. 7, la temperatura promedio de las paredes del horno y de los gases de combustión no cambia significativamente al variar la presión atmosférica. El cambio en el flujo de calor por radiación se debe entonces a la variación con la presión del coeficiente de absorción de los gases de combustión. Al disminuir la presión disminuye también el coeficiente de absorción, lo cual, por un lado, disminuye la radiación emitida directamente desde los gases y por otro lado, para una misma temperatura de paredes, aumenta la cantidad de radiación emitida por las paredes que llega a la carga, ya que los gases absorben menos de ésta. Al nivel del mar la distribución del flujo de calor es en promedio 9% convección, 57% radiación de las paredes y 34% radiación de los gases; al reducir la presión atmosférica a 0.74 atm, la distribución cambia a 9%, 66% y 24%, respectivamente.

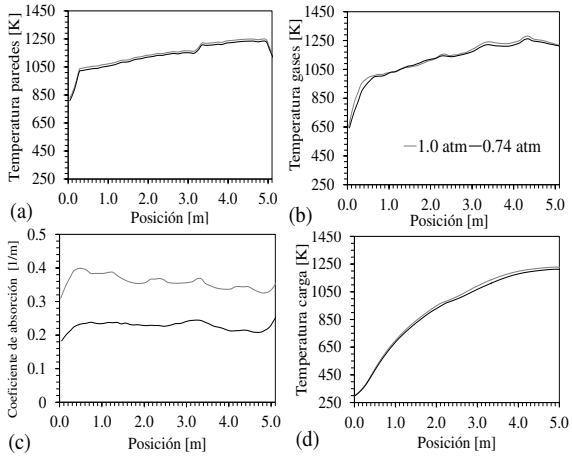


Fig. 7. Variación a lo largo del horno de (a) Temperatura promedio de las paredes. (b) Temperatura promedio de los gases, (c) Coeficiente de absorción promedio de los gases y (d) Temperatura de la carga.

Como resultado de la variación en el flujo de calor hacia la carga, la temperatura de la carga a la salida del horno es mayor a la condición de mayor presión atmosférica (menor altura sobre el nivel del mar) pasando de 1212 K a 0.74 atm a 1227 K a 1.0 atm. Esto se aprecia en la Fig. 7(c), donde se muestra la curva de calentamiento de la carga a lo largo del horno. Este cambio en la temperatura corresponde a una variación de 0.5 puntos porcentuales en la eficiencia útil del proceso.

5. CONCLUSIONES

La presión atmosférica tiene un gran efecto sobre la operación del horno como resultado de la variación en los flujos másicos de aire y combustible asociado a los sistemas auxiliares del horno. Al pasar de operar a nivel del mar a hacerlo a una altura de 2600 m.s.n.m se reduce cerca de un

14% la potencia térmica del horno y un 15% el factor de aireación.

Si los problemas asociados a los auxiliares son resueltos, la presión atmosférica no tiene un efecto muy significativo sobre el calentamiento de la carga. No obstante, la forma en la que fluye el calor hacia la carga si cambia considerablemente, disminuyendo la participación de los gases en la radiación a medida que disminuye la presión atmosférica pasando de aportar un 34% de la energía total que llega a la carga a aportar 24% cuando el horno opera a una altura de 2600 m.s.n.m.

Los resultados reportados en este trabajo respecto al efecto de la presión atmosférica sobre la transferencia de calor pueden variar en función de la temperatura de operación del horno y el tamaño del mismo. En hornos que operan a temperaturas por debajo de 600°C, predomina la transferencia de calor por convección, por lo que el efecto de la presión atmosférica sobre la velocidad del flujo de gases, pasa a ser significativa. Así mismo, la radiación emitida por los gases de combustión es función del volumen de gases (tamaño del horno), por lo que para hornos más grandes el efecto que tiene la presión atmosférica sobre el flujo de calor por radiación es mayor.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a COLCIENCIAS que a través del "Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas" financió la "Red de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial Fase II – INCOMBUSTION" en el proyecto "Aumento de producción y optimización del consumo de gas natural por la recuperación de calor residual en la línea de tratamiento térmico de una empresa del sector industrial colombiano con la implementación y adaptación de nuevas tecnologías de combustión". También a la Universidad de Antioquia UdeA a través de su programa de sostenibilidad.

REFERENCIAS

Amell, Andrés A. 2007. "Influence of Altitude on the Height of Blue Cone in a Premixed Flame." *Applied Thermal Engineering* 27(2–3): 408–12.

ANSYS Inc. 2017. *ANSYS Fluent Theory Guide*. 18.0. ed. Inc. ANSYS. Canonsburg, PA, USA. http://www.ansys.com.

Baukal Jr, Charles E. 2000. *Heat Transfer in Industrial Combustion*. CRC press. BOOK.

British Iron, and Steel Research Association. 1953. *Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures:(Based on Measurements Made at the National Physical Laboratory, Teddington).* Butterworths Scienctific Publations.

Burbano, Hugo J., Jhon Pareja, and Andrés A. Amell. 2011. "Laminar Burning Velocities and Flame Stability Analysis of Syngas Mixtures at Sub-Atmospheric Pressures." *International Journal of Hydrogen Energy* 36(4): 3243–52.

Churchill, Stuart W., and Humbert H.S. Chu. 1975. "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18(11): 1323–29.

Davies, Theodore E. 1972. "Burner Structure and Method." : 9.

Egolfopoulos, F. N., and C. K. Law. 1991. "An Experimental and Computational Study of the Burning Rates of Ultra-Lean to Moderately-Rich H2/O2/N2laminar Flames with Pressure Variations." *Symposium (International) on Combustion* 23(1): 333–40.

Egolfopoulos, F N, and C K Law. 1990. "Chain Mechanims in the Overall Reaction Orders in Laminar Flame Propagation." *Combustion and Flame* 80: 7–16. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001021809090049W.

fives north american. 2006. "The Hallmark of High Velocity Burners." (August): 19–20.

García, Alex M., and Andrés A. Amell. 2018. "A Numerical Analysis of the Effect of Heat Recovery Burners on the Heat Transfer and Billet Heating Characteristics in a Walking-Beam Type Reheating Furnace." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127: 1208–22. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018321756 (August 6, 2018).

Han, Sang Heon, Daejun Chang, and Chang Young Kim. 2010. "A Numerical Analysis of Slab Heating Characteristics in a Walking Beam Type Reheating Furnace." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53(19–20): 3855–3861.

Huang, Mei-Jiau, Chia-Tsung Hsieh, Shih-Tuen Lee, and Chao-Hua Wang. 2008. "A Coupled Numerical Study of Slab Temperature and Gas Temperature in the Walking-Beam-Type Slab Reheating Furnace." *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 54(6): 625–46. http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407780802289475.

Lloyd, J. R., and W. R. Moran. 1974. "Natural Convection Adjacent to Horizontal Surface of Various Planforms." *Journal of Heat Transfer* 96(4): 443. http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1435958.

Peters, N. 1984. "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion." *Progress in Energy and Combustion Science* 10(3): 319–39.

Prieler, Rene et al. 2016. "Prediction of the Heating Characteristic of Billets in a Walking Hearth Type Reheating Furnace Using CFD." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 92: 675–88. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.056.

Raithby, G D, and E H Chui. 1990. "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media." *Journal of Heat Transfer* 112(2): 415–23.

Shih, T H et al. 1995. "A New K-Epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows: Model Development and Validation." *Computer \& Fluids* 24(August): 227–38.

Smith, T. F., Z. F. Shen, and J. N. Friedman. 1982. "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model." *Journal of Heat Transfer* 104(4): 602.

Touloukian, Yeram Sarkis, and David P DeWitt. 1989. *Themal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys*. UMI.

Trinks, Willibald et al. 2004. 1 *Industrial Furnaces*. John Wiley & Sons.

Unidad de Planeación Minero Energética-UPME. 2010. "Proyección de Demanda de Energía En Colombia." *Energia, Minero*: 90. http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYECC_DEMANDA_ENERGIA_OCTUBRE_2010.pdf.

University of California at San Diego. 2016. "Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications." *San Diego Mechanism web page*. http://combustion.ucsd.edu.

Zeng, Yi et al. 2013. "Momentum-Dominated Methane Jet Flame at Sub-Atmospheric Pressure." *Procedia Engineering* 62: 924–31. http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.144.

DESEMPEÑO DE UN HORNO DE CALENTAMIENTO LUEGO DE REPOTENCIACIÓN CON QUEMADORES AUTO-RECUPERATIVOS: ANÁLISIS NUMÉRICO

PERFORMANCE OF A REHEATING FURNACE AFTER RETROFIT WITH SELF-RECUPERATING BURNERS: NUMERICAL ANALYSIS

Ing. Alex M. García Vergara, Ing. Julián E. Obando Arbelaez &
MSc. Andrés A. Amell Arrieta

Universidad de Antioquia - UdeA, Facultad de Ingeniería, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía - GASURE.
Calle 67 N° 53 - 108, Medellín, Colombia. +57 (4) 2198545.
E-mail: alex.garciav@udea.edu.co, obando1989@gmail.com & andres.amell@udea.edu.co

Resumen: El sector industrial colombiano es un gran consumidor de energía térmica, proveniente de la combustión. Por lo tanto, Colombia no es ajeno a las problemáticas asociadas al aumento de la demanda energética y las emisiones contaminantes. Los hornos de calentamiento son equipos ampliamente utilizados en la industria tanto a nivel mundial como nacional, siendo los segundos mayores consumidores de energía y productores de CO2. En este trabajo se evalúa, mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional, la repotenciación de un horno de calentamiento de vigas caminantes, mediante la implementación de quemadores auto-recuperativos. Se compara la operación del horno antes y después de la repotenciación, en función de la eficiencia térmica del proceso y las características de calentamiento de la carga. Se encontró que con el cambio de quemadores el consumo de combustible se reduce en un 30%, sin afectar negativamente la calidad del proceso. También se evidenció que para la implementación de esta tecnología de combustión sería necesario modificar la posición de uno de los quemadores.

Palabras clave: Dinámica de fluidos computacional (CFD), Repotenciación, quemadores auto-recuperativos, Hornos de calentamiento.

Abstract: Colombian's industrial sector is a great consumer of thermal energy from fuel combustion. Thus, Colombia is not alien to the problems associated with the increase in energy demand and polluting emissions. Reheating furnaces are widely used in industry, both nationally and globally, and constitute the second largest consumers of energy and producers of CO2. In this work, the retrofit of a walking-beam type reheating furnace was evaluated by means of the implementation of self-recuperative burners. Computational fluid dynamics simulations were made for this purpose. The operation of the furnace was compared before and after the retrofit, based on the thermal efficiency of the process and the heating characteristics of the load. 30% of fuel consumption was reduced after changing burner technology, without negatively affecting the quality of the process. It was also evidenced that for the implementation of this combustion technology it would be necessary to modify the position of one of the burners

Keywords: Computational fluid dynamics (CFD), retrofit, self-recuperative burners, reheating furnaces.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la demanda energética y las complicaciones asociados a las emisiones contaminantes se han establecido como un gran problema que enfrenta actualmente la sociedad (Seale and Solano 2012)(IEA 2015). No siendo ajeno a este hecho, Colombia, entre los compromisos adquiridos en el COP-21 en 2015, se ha comprometido a reducir en un 20% las emisiones proyectadas para el año 2030 teniendo como línea base las emisiones del año 2015 (García Arbeláez et al. 2015). Pese a que gran parte de la demanda de energía eléctrica del país se abastece con fuentes hidráulicas, el sector industrial es un gran consumidor de energía térmica proveniente de la combustión de combustibles fósiles (UPME 2010), donde la obsolescencia tecnológica de hornos y calderas es una de las principales razones de la ineficiencia energética de los procesos de calentamiento y los altos consumos de energía.

El sector metal-mecánico se destaca por ser uno de los mayores consumidores de energía térmica dentro del sector industrial. Sus altos consumos se deben a los numerosos procesos de alta temperatura involucrados en la producción de piezas metálicas (Baukal Jr 2000). Los hornos de calentamiento son un componente crucial dentro de este sector, siendo los segundos mayores consumidores de energía y productores de CO_2 en esta industria (Trinks et al. 2004).

Una forma muy usada para disminuir el consumo de combustible en procesos de alta temperatura es mediante el uso de quemadores con recuperación de calor (Baukal Jr 2003). Los quemadores con recuperación de calor integrada constituyen el método más eficiente para recuperar el calor sensible portado por los productos de combustión en hornos industriales operando a altas temperaturas.

En este trabajo se evalúa mediante simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics) el efecto que tiene el cambio de quemadores convencionales por quemadores auto-recuperativos sobre la operación de un horno de calentamiento en términos de la eficiencia del proceso y las características del proceso de calentamiento, analizando las modificaciones necesarias para verificar que el proceso no se vea afectado de forma adversa.

2. DESCRIPCIÓN DEL HORNO

El horno estudiado en este trabajo es un horno de calentamiento de vigas caminantes, utilizado para el calentamiento de palanquilla en un proceso de templado, el cual está instalado en la ciudad de Bogotá, Colombia. La geometría interna del horno se presenta en la Fig. 1, cuyas dimensiones principales son 5.07 m x 1.02 m x 2.12 m. El horno se encuentra dividido en dos zonas, una zona inicial más larga donde se da el pre-calentamiento de las piezas (zona 1) y una zona final más corta donde las piezas se terminan de calentar hasta una temperatura alrededor de 1210 K (zona 2). Estas dos zonas están divididas por una cortina de material aislante de una altura de 23 cm y un espesor de 19 cm. La palanquilla a calentar tiene unas dimensiones de 7.0 x 1.1 x 150 cm y es ubicada en la parte inferior. Las palanquillas entran al horno a una temperatura de 297 K y se desplazan por el interior del horno mediante un movimiento intermitente de un paso cada 24 s. En cada momento hay alrededor de 63 piezas al interior del horno, las cuales se desplazan a una velocidad media de 2.7 mm/s, correspondiente a una producción de 1.27 toneladas por hora (0.353 kg/s).

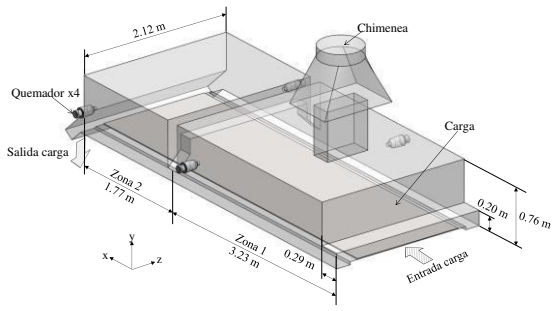


Fig. 1. Esquema del horno de calentamiento de vigas caminantes.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los materiales aislantes utilizados en el horno. El piso del horno, tanto las vigas móviles como las fijas, está construido con ladrillo refractario con un espesor total de 34 cm. Por otro lado, las paredes y el techo están aislados con un espesor de 24 cm de

manta cerámica, a excepción del tramo final de la chimenea que esta sin aislamiento.

Tabla 1. Propiedades termodinámicas del aislamiento @ 1273 K

		Manta cerámica	Ladrillo refractario
Densidad	[kg/m^3]	128	2230
Calor especifico	[J/kg K]	1130	960
Conductividad térmica	[W/m K]	0.25	1.66
Emisividad	[-]	0.68	0.75

2.1 Quemadores

El combustible usado para el proceso de calentamiento es gas natural de Cusiana, cuya composición en volumen es: 82.8% CH_4, 10.0% C_2H_6, 3.6% C_3H_8, 1.2% $>C_3$, 1.9% CO_2 y 0.5% N_2. El poder calorífico superior del combustible a condiciones estándar es de 41153.0 kJ/m^3 y el volumen de aire estequiométrico es de 10.45 m^3_a/m^3_f. Para las condiciones de carga descritas, el horno opera con una potencia total de 670 kW en base al PCS, distribuida en cuatro quemadores, dos en cada zona. La potencia en la zona 1 es 57% de la potencia total y el 43% restante corresponde a la zona 2. Los cuatro quemadores operan con un factor de aireación de 1.25.

Los quemadores están ubicados en las caras laterales del horno transversalmente a la dirección de movimiento de la carga, a una altura sobre ésta de 0.36 m. Los quemadores están distribuidos en el horno de forma escalonada, dos en cada zona, a una distancia de la entrada de la carga de 1.82 m, 2.74 m, 3.88 m y 4.81 m, respectivamente.

Actualmente el horno está equipado con cuatro quemadores de alta velocidad marca Fives North American - Estándar Tempest 4442. En estos el aire y el combustible se mezclan por etapas y reaccionan mientras son inyectados en el horno a través de una sección de 5 cm de diámetro (Davies 1972) (fives north american 2006).

La repotenciación del horno consiste en remplazar los quemadores actuales por quemadores auto-recuperativos (Baukal Jr 2003), los cuales tienen una mayor eficiencia de combustión; ya que precalientan el aire de combustión al aprovechar parte de la energía que tiene los gases calientes antes de salir del horno. Los quemadores auto-recuperativos a usar son quemadores de alta velocidad y mezclado en la boquilla marca Eclipse TJSR0060 (Eclipse Inc. 2012).

La chimenea del horno cuenta con un damper para regular la presión de operación del horno. Actualmente el horno opera con el damper completamente cerrado, por cuestión de estabilidad de la combustión en los quemadores. Debido a esto, los gases de combustión salen del horno por las aperturas que éste tiene para la entrada y salida de la carga. Esta condición se mantendrá al cambiar los quemadores, no obstante, ahora el 80% de los gases de combustión saldrán del horno por los quemadores (Baukal Jr 2003) y el 20% restante por las aperturas del horno.

3. MODELO NUMÉRICO

Para las simulaciones se utilizó el solucionador de doble precisión basado en la presión del software comercial ANSYS® - Fluent® versión 18.0. El interior del horno está lleno de una mezcla de gases resultado del proceso de combustión del gas natural que se lleva a cabo en los quemadores. Esta mezcla de gases se modela como un fluido Newtoniano, incompresible y que fluye en estado estable. Por lo que su fluidodinámica se puede describir por las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas con base al Reynolds (*Reynolds Average Navier-Stokes* - RANS). Los cambios en la densidad debido a la temperatura se tienen en cuenta siguiendo la ley de gases ideales. Para el acople presión-velocidad y para la interpolación de la presión se usan los algoritmos *Couple* y *PRESTO!* (ANSYS Inc. 2017), respectivamente. La turbulencia se modeló con el modelo k-ε realizable (Shih et al. 1995) y para el cálculo del flujo en la región viscosa de la capa limite en la cercanía de las paredes se usa el método *Enhanced Wall treatment* (EWT) (ANSYS Inc. 2017) en combinación con el modelo k-ε realizable, teniendo en cuenta los efectos térmicos. La combustión se modeló con el *Steady Diffusion Flamelet model* (Peters 1984). Dado que el combustible que usa el horno es gas natural, se usó el mecanismo cinético *UC San Diego* (University of California at San Diego 2016). El calor específico de la mezcla de gases se calcula siguiendo la ley de mezclado, por otro lado, la viscosidad y la conductividad térmica se definieron como función

de la temperatura usando los polinomios de primer grado ajustados a partir de las propiedades de una composición de gases de combustión típica usando la teoría cinética de gases. La radiación se modeló con el *Discrete Ordinates model* (Raithby and Chui 1990), junto con el *weighted-sum-of-grey-gases model* con los coeficientes de (Smith, Shen, and Friedman 1982) para el cálculo del coeficiente de absorción de los gases. Este conjunto de modelos han mostrado tener una muy buena capacidad para predecir el comportamiento en hornos de vigas caminantes (Han, Chang, and Kim 2010; Prieler et al. 2016; García and Amell 2018).

Para modelar el movimiento y calentamiento de la carga al interior del horno en este trabajo se utiliza la estrategia propuesta por (Huang et al. 2008), debido a su fácil implementación y su buena relación precisión/costo-computacional. Esta estrategia se basa en modelar la carga como una lámina continua que atraviesa el horno, por la cual fluye un fluido de muy alta viscosidad (10^6 kg/m s) con las propiedades termo-físicas del material de la carga. Esta estrategia permite simular el calentamiento de la carga como un proceso estacionario. El material de la carga es acero de medio carbono (0.49C - 0.8Cr [wt-%]). El calor específico y la conductividad térmica del material se definieron en función de la temperatura, debido al efecto de ésta sobre estas propiedades, como se muestra en la Fig. 2. Para la emisividad de la superficie de la carga se tomó un valor constante de 0.85, ya que este es el valor promedio alrededor del cual varia la emisividad del acero al cromo debido a la temperatura y la oxidación. (Touloukian and DeWitt 1989)

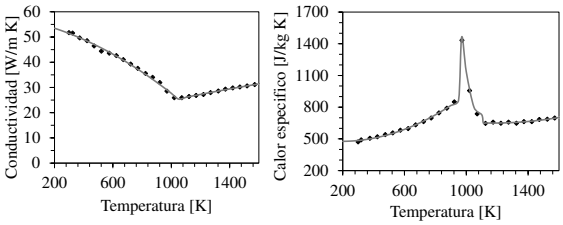


Fig. 2. Conductividad térmica y calor específico de la carga en función de la temperatura (British Iron and Steel Research Association 1953).

La temperatura a la que se precalienta el aire de combustión en los quemadores auto-recuperativos (T_{aire}) es función de la temperatura de los gases que entran al recuperador (T_{gases}) y el flujo másico del aire de combustión ($\dot{m}_{aire}$). Debido a que T_{gases} depende de es un resultado de la simulación, T_{aire} se calculó durante la simulación usando la Ecuación (1), donde T_{ref}, a, b y c son constantes iguales a 298.15 K, 0.06055, 6.35145 y 1.36562, respectivamente (García and Amell 2018).

$$T_{aire} = T_{ref} + a\, e^{-b\, \dot{m}_{aire}} \left(T_{gases} - T_{ref}\right)^{c} \qquad (1)$$

Las paredes del horno no se incluyen dentro de la simulación. Para considerar las pérdidas de energía a través de las paredes y el suelo del horno, estas se modelan mediante la ecuación de conducción en una dimensión, teniendo en cuenta el espesor de las paredes y las propiedades del material aislante (Tabla 1). Las paredes externas del horno tienen una emisividad de 0.5 y el coeficiente de transferencia de calor por convección natural se calculó mediante las correlaciones del número Nusselt propuestas por (Churchill and Chu 1975; Lloyd and Moran 1974). El lugar donde opera el horno tiene una temperatura ambiente de 297.15 K y una presión atmosférica de 746.6 mbar.

3.1 Mallado

En la Fig. 3 se muestra un ejemplo del mallado usado para realizar las simulaciones numéricas. Los mallados fueron construidos por medio del software Icem CFD, usando la estrategia de división por bloques, que permite obtener mallados estructurados de elementos hexaédricos de muy buena calidad, ya que se ha demostrado que este tipo de mallado es el adecuado cuando se resuelven problemas que involucran combustión (Prieler et al. 2014). El dominio de interés para la simulación del horno, comprende el volumen al interior del horno donde pueden fluir los gases de combustión, el volumen correspondiente a la carga y dos volúmenes de aire a la entrada y salida del horno. Los mallados utilizados para las simulaciones tienen en promedio 990000 elementos.

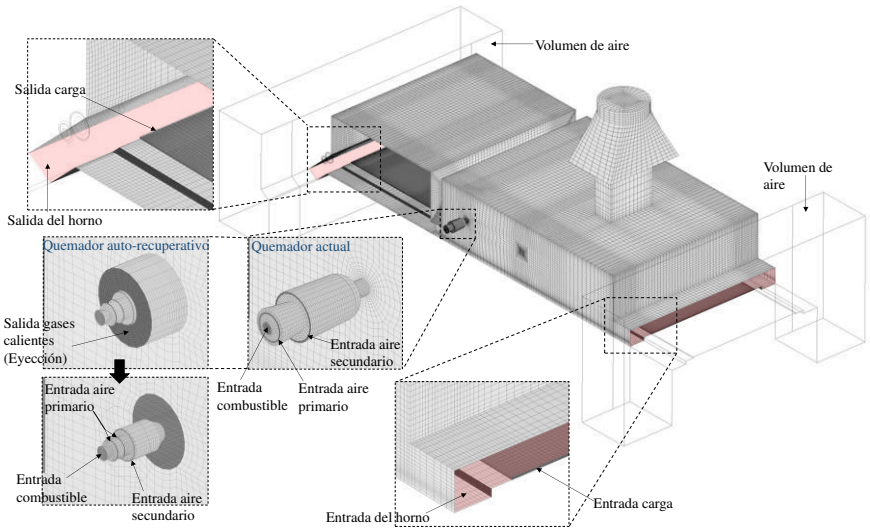


Fig. 3. Ejemplo del mallado usado en este trabajo para realizar las simulaciones numéricas

4. RESULTADOS

Además de las simulaciones del horno operando con los quemadores auto-recuperativos, también se realizó una simulación del horno con los quemadores actualmente instalados para comparar el desempeño luego del cambio de tecnología. Con los quemadores auto-recuperativos, una mayor cantidad de la energía suministrada por el combustible logra llegar a la carga, como resultado de la recuperación de calor. Lo cual implica que se puede reducir la potencia de operación del horno para la misma producción (0.353 kg/s) y temperatura de salida de la carga (1210 K). Para estas condiciones, la potencia con los quemadores auto-recuperativos fue de 460 kW, en comparación a 670 kW con los quemadores actuales. Esto implica una reducción del consumo de combustible de 31.3%.

En la Fig. 4 se presentan los contornos de temperatura al interior del horno, en el plano horizontal que coincide con la posición de los quemadores. La región de mayor temperatura corresponde a la zona donde se dan las reacciones de combustión, con una temperatura máxima de alrededor de 1850K para el caso sin recuperación y 2200 K para el caso con recuperación. En esta figura también se presentan las líneas de corriente de los gases al interior del horno en las que se puede apreciar cómo con ambos quemadores se presentan zonas de recirculación debido a los patrones de corriente de los gases, inducidas por el momento de los gases de combustión inyectados a alta velocidad por los quemadores. A esto también se le atribuye que al lado opuesto de cada quemador los gases inyectados se deflecten hacia el quemador próximo más cercano.

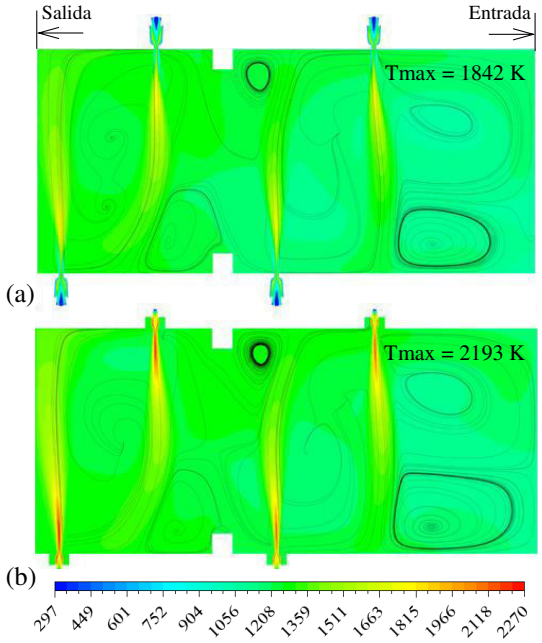


Fig. 4. Contornos de temperatura [K]. (a)Quemadores actuales (b) Quemadores auto-recuperativos.

La distribución de energía en el horno para el caso con y sin recuperación de calor se presenta en la Fig. 5. En el caso con los quemadores actuales se observa como la mayoría de la energía suministrada por el combustible sale del horno en los gases de combustión, representando en total 53 % de la energía suministrada por el combustible. Las pérdidas por paredes y aperturas suman 14.5%, por lo que hacia la carga solo va el 32.7 % de la energía suministrada por el combustible. Para el caso con quemadores auto-recuperativos la misma cantidad de energía va a la carga, pero en este caso representa un mayor porcentaje (47.6%), debido a que se redujo la potencia de los quemadores. La menor potencia también explica por qué la energía de los gases, latente y sensible total (incluyendo E. recuperación), son menores en el caso con quemadores auto-recuperativos, debido a que hay una menor masa de gases saliendo del horno. La energía recuperada en los quemadores equivale a un 20.9% de la potencia de entrada, ahora solo 24.8% de la energía se pierde en forma de calor sensible de gases, en comparación al 44.8% con los quemadores actuales.

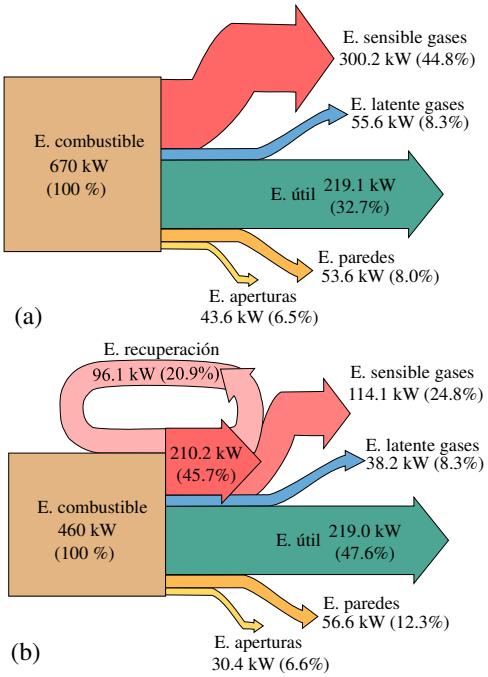


Fig. 5. Diagramas Sankey del horno con (a) quemadores actuales y (b) quemadores auto-recuperativos.

El calentamiento de la carga es una de las variables de mayor importancia al evaluar el cambio de quemadores sobre desempeño del horno de calentamiento, debido a que es ésta la que determina la calidad del proceso. Variables como la velocidad de calentamiento, la temperatura y tiempo de sostenimiento, influyen en las propiedades del material después del tratamiento térmico (ASM 1981). Debido a esto, es necesario verificar que el cambio de los quemadores no afecta negativamente los parámetros de calentamiento de la carga. En la Fig. 6(a) se muestra como varia la temperatura medida en el centro de la palanquilla conforme ésta se mueve a lo largo del horno. Como se puede observar el cambio por quemadores auto-recuperativos no afecta significativamente el proceso de calentamiento de la palanquilla, lo cual se debe en parte a que se seleccionó un quemador del mismo tipo ya instalado (quemador de alta velocidad). No obstante, como se puede ver en la Fig. 6(b), donde se presenta la temperatura a lo largo de la palanquilla cuando en el punto en el que ésta sale del horno, hay una mayor variación en la temperatura en el caso con quemadores auto-recuperativos. Esta diferencia de temperatura es de 50 K, en comparación a 15 K con los quemadores actuales.

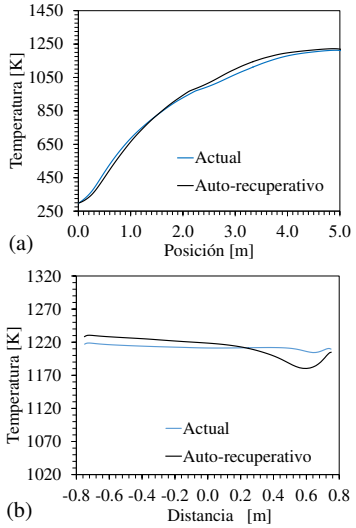


Fig. 6. Calentamiento de la carga con los quemadores actuales y auto-recuperativos. (a) Curva de calentamiento. (b)Temperatura a lo largo de la palanquilla a la salida del horno.

Esta mayor diferencia de temperatura se debe a un enfriamiento de la carga causado por la entrada de aire frio del exterior hacia el interior del horno. La entrada de aire frío al horno es causada por la

proximidad con la pared del quemador a la salida del horno, como ya se mencionó, el jet de gases de combustión en este quemador se deflecta hacia el interior del horno, produciendo con esto unas corrientes de flujo que inducen la entrada de aire frío al lado opuesto del quemador. Por otro lado, cuando se tiene recuperación de calor el 80% de los gases de combustión salen por los quemadores disminuyendo la presión interna del horno, lo cual, junto con el mayor impulso de la inyección en los quemadores debido al precalentamiento del aire, provoca un aumento en la entrada de aire frío del exterior. Esto explica que el enfriamiento de la carga al final del horno es más drástico cuando se tienen los quemadores auto-recuperativos.

Con el objetivo de corregir este problema, se evaluó modificar la posición de este quemador en el horno, alejándolo 32 cm de la salida del horno, con respecto a su posición actual. En la Fig. 7 se muestran el contorno de temperatura y las líneas de corriente a la altura de los quemadores obtenidas luego de mover el quemador. Al comparar este resultado con el mismo cuando no se mueva el quemador, se observa que al mover el último quemador se modifican las corrientes de flujo en esta zona del horno. La entrada de aire por la salida del horno se reduce significativamente. Esto hace que la temperatura en esta zona aumente, lo que explica porque se presenta una temperatura máxima mayor para este caso.

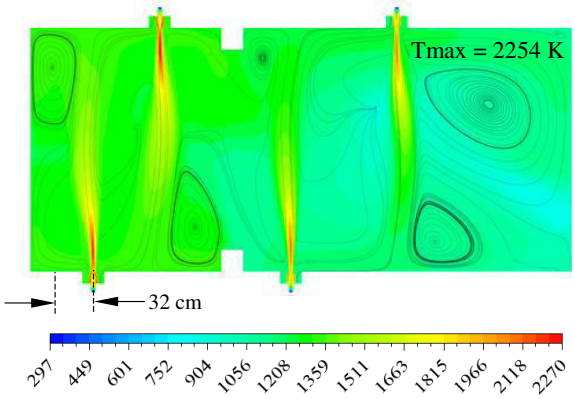


Fig. 7. Contornos de temperatura [K]. Quemadores auto-recuperativos modificando la posición del último quemador (P2).

Los resultados del calentamiento de la carga luego de modificar la posición del último quemador se presentan en la Fig. 8(a). Como comparación también se presentan los resultados del caso sin mover el quemador. En la curva de calentamiento se observa como la velocidad de calentamiento de la carga en la zona 1 se reduce luego de modificar la posición del quemador, lo cual es resultado de la variación en las corrientes de flujo en el horno. En la zona 2 donde las temperaturas son mayores, la velocidad de calentamiento aumenta y la carga alcanza la temperatura de salida deseada. La nueva curva de calentamiento sigue siendo adecuada para el proceso, no hay un sobrecalentamiento de la carga al comienzo del horno y la temperatura de austentización se alcanza un poco después de los 3 m.

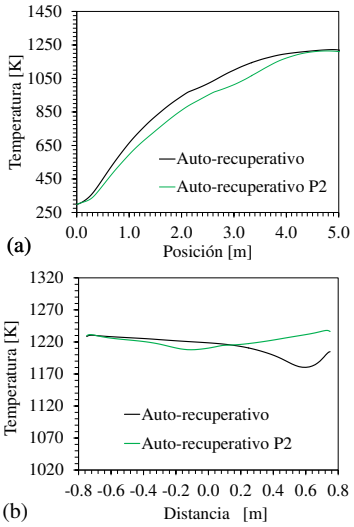


Fig. 8 Calentamiento de la carga con los auto-recuperativos en la posición actual y modificando la posición del ultimo quemador (P2). (a) Curva de calentamiento. (b)Temperatura a lo largo de la palanquilla a la salida del horno.

Por el lado de la homogeneidad de la temperatura de la carga, se obtuvo que con la modificación realizada se disminuyó la diferencia de temperatura de la carga a la salida del horno, pasando de una diferencia de 50 K a una diferencia de 29 K, como se aprecia mejor en la Fig. 8(b) donde se muestra la variación de la temperatura de la carga al momento que sale del horno. Esta diferencia sigue siendo mayor a la obtenida con los quemadores actuales, sin embargo es un buen resultado, que permite aprovechar las ventajas de los quemadores auto-

recuperativos garantizando una afectación mínima del proceso de calentamiento.

5. CONCLUSIONES

Cambiar los quemadores de alta velocidad convencionales por quemadores auto-recuperativos permite en el horno estudiado reducir el consumo de combustible en un 31%, sin variar considerablemente las características de calentamiento de la carga. Lo que permite pasar de una eficiencia útil de 32.7% a una eficiencia útil promedio de 47.6%.

La ubicación del quemador más cercano a la salida de la carga induce la entrada de aire frío del exterior hacia el interior del horno lo que enfría la carga en el lado opuesto al quemador, afectando la homogeneidad de la temperatura de la carga a la salida del horno. Este efecto se magnifica con el uso de los quemadores auto-recuperativos, debido al aumento del impulso de los gases inyectados y una reducción en la presión interna del horno, causada por la eyección.

Al modificar la posición del último quemador auto-recuperativo hacia el interior del horno se consiguió corregir el problema de la entrada de aire frío por la salida del horno, mejorando la uniformidad de la temperatura final de la carga. Cabe mencionar que la variación de la posición del quemador se evaluó manteniendo constante las condiciones de operación. Una modificación en cómo se distribuye la potencia entre la zona1 y la zona 2 permitiría obtener un resultado aún mejor, en cuanto a la curva de calentamiento.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer a COLCIENCIAS a través del "Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas" por el financiamiento de la "Red de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial Fase II – INCOMBUSTION" en el proyecto "Aumento de producción y optimización del consumo de gas natural por la recuperación de calor residual en la línea de tratamiento térmico de una empresa del sector industrial colombiano con la implementación y adaptación de nuevas tecnologías de combustión". Por último, pero no menos importante a la Universidad de Antioquia UdeA a través del programa de sostenibilidad.

REFERENCIAS

ANSYS Inc. 2017. *ANSYS Fluent Theory Guide*. 18.0. ed. Inc. ANSYS. Canonsburg, PA, USA. http://www.ansys.com.

ASM. 1981. *Metals Handbook. "Heat Treating". Vol.4*. 9th ed. Metals Park.

Baukal Jr, Charles E. 2003. *Industrial Burners Handbook*. ed. Charles E. Baukal. CRC Press.

Baukal Jr, Charles E. 2000. *Heat Transfer in Industrial Combustion*. CRC press.

British Iron, and Steel Research Association. 1953. *Physical Constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures:(Based on Measurements Made at the National Physical Laboratory, Teddington).* Butterworths Scienctific Publations.

Churchill, Stuart W., and Humbert H.S. Chu. 1975. "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18(11): 1323–29.

Davies, Theodore E. 1972. "Burner Structure and Method." : 9.

Eclipse Inc. 2012. "Eclipse ThermJet Self-Recuperative Burners - TJSR0060."

fives north american. 2006. "The Hallmark of High Velocity Burners." (August): 19–20.

García, Alex M., and Andrés A. Amell. 2018. "A Numerical Analysis of the Effect of Heat Recovery Burners on the Heat Transfer and Billet Heating Characteristics in a Walking-Beam Type Reheating Furnace." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127: 1208–22. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018321756 (August 6, 2018).

García Arbeláez, C, X Barrera, R Gómez, and R Suárez Castaño. 2015. "El ABC de Los Compromisos de Colombia Para La COP21."

Han, Sang Heon, Daejun Chang, and Chang Young Kim. 2010. "A Numerical Analysis of Slab Heating Characteristics in a Walking Beam Type Reheating Furnace." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53(19–20): 3855–3861.

Huang, Mei-Jiau, Chia-Tsung Hsieh, Shih-Tuen Lee, and Chao-Hua Wang. 2008. "A Coupled Numerical Study of Slab Temperature and Gas Temperature in the Walking-Beam-Type Slab Reheating Furnace." *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 54(6): 625–46. http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407780802289475.

IEA. 2015. “Energy and Climate Change.” *World Energy Outlook Special Report*: 1–200.

Lloyd, J. R., and W. R. Moran. 1974. “Natural Convection Adjacent to Horizontal Surface of Various Planforms.” *Journal of Heat Transfer* 96(4): 443. http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1435958.

Peters, N. 1984. “Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion.” *Progress in Energy and Combustion Science* 10(3): 319–39.

Prieler, Rene et al. 2016. “Prediction of the Heating Characteristic of Billets in a Walking Hearth Type Reheating Furnace Using CFD.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 92: 675–88. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.056.

Prieler, Rene, Martin Demuth, Davor Spoljaric, and Christoph Hochenauer. 2014. “Evaluation of a Steady Flamelet Approach for Use in Oxy-Fuel Combustion.” *Fuel* 118: 55–68. http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.052.

Raithby, G D, and E H Chui. 1990. “A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media.” *Journal of Heat Transfer* 112(2): 415–23.

Seale, James L, and Alexis A Solano. 2012. “The Changing Demand for Energy in Rich and Poor Countries over 25years.” *Energy Economics* 34(6): 1834–44.

Shih, T H et al. 1995. “A New K-Epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows: Model Development and Validation.” *Computer \& Fluids* 24(August): 227–38.

Smith, T. F., Z. F. Shen, and J. N. Friedman. 1982. “Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model.” *Journal of Heat Transfer* 104(4): 602.

Touloukian, Yeram Sarkis, and David P DeWitt. 1989. *Themal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys*. UMI.

Trinks, Willibald et al. 2004. 1 *Industrial Furnaces*. John Wiley & Sons.

Unidad de Planeación Minero Energética-UPME. 2010. “Proyección de Demanda de Energía En Colombia.” *Energia, Minero*: 90. http://www.upme.gov.co/Docs/Energia/PROYEC_DEMANDA_ENERGIA_OCTUBRE_2010.pdf.

University of California at San Diego. 2016. “Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications.” *San Diego Mechanism web page*. http://combustion.ucsd.edu.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

CARACTERIZACIÓN FÍSICA-QUÍMICA-ENERGÉTICA DE PELLETS DE HOJARASCA RESIDUAL COMO BIOCOMBUSTIBLE RENOVABLE

PHYSICAL-CHEMICAL-ENERGY CHARACTERIZATION OF WASTE FALLEN LEAVES PELLETS AS A RENEWABLE BIOFUEL

William A. González[*], Diana López[**], Juan F. Pérez[*]

[*] **Universidad de Antioquia,** Facultad de ingeniería, Grupo GIMEL.
Calle 67 # 53-10, Medellín, Antioquia, Colombia.
Teléfono: +57 4 219 5550
E-mail: williama.gonzalez@udea.edu.co
jfernando.perez@udea.edu.co
[**] **Universidad de Antioquia,** Facultad de ciencias exactas y naturales, Grupo QUIREMA.
Calle 67 # 53-10, Medellín, Antioquia, Colombia.
Teléfono: +57 4 219 6614
E-mail: diana.lopez@udea.edu.co

Resumen: En el campus central de la Universidad de Antioquia se generan alrededor de 2.8 ton/mes de hojarasca (base seca). El objetivo de este trabajo es evaluar este material residual como alternativa energética mediante la estimación de su potencial energético y la caracterización física y termoquímica de la biomasa residual sometida a un pretratamiento de densificación (peletizado). Para la obtención del combustible se utilizó una peletizadora a escala de laboratorio (30-40 kg/h), para la preparación de los pellets se evaluó el contenido de humedad y de glicerol como agentes aglomerantes dentro de la mezcla. El material densificado posee una densidad energética entre 5500-7300 MJ/m^3 frente a 2800 MJ/m^3 de la hojarasca sin pretratamiento. El aumento de este parámetro muestra un mejoramiento de las propiedades energéticas del combustible para ser usado en procesos termoquímicos. Con el aumento del contenido de humedad se encuentra una disminución del 15% en la cantidad de material volátil del combustible. Evaluando las propiedades físicas se encuentra que la resistencia a la tracción de los pellets varía entre 220-240 kPa y que con el aumento del contenido de glicerol los pellets tienen una mayor capacidad de deformación (deformaciones entre 0.5-2.25 mm), lo que se relaciona con una mayor durabilidad de los pellets.

Palabras clave: Hojarasca, densificación, pellets, residuos a energía, valoración energética.

Abstract: The University of Antioquia main campus generates about 2.8 ton/month of fallen leaves (dry basis). The objective of this work is to evaluate this waste material as an energy alternative by estimating the energy potential and the physical and thermochemical characterization of the residual biomass subjected to a densification pre-treatment (pelletizing process). To obtain the fuel a pelletizer was used on a laboratory scale (30-40 kg/h). For the preparation of the pellets the moisture and glycerol content were evaluated as binder agents within the mixture. The densified material has an energy density between 5500-7300 MJ/m^3 versus 2800 MJ/m3 of fallen leaves without

pretreatment. The increase of this parameter shows an improvement of the energy properties of the fuel to be used in thermochemical processes. The fuel volatile matter decrease 15% when the moisture content increase. Evaluating the physical properties it was found that the tensile strength of the pellets is between 220-240 kPa and that with the increase of the glycerol content the pellets have a greater capacity of deformation (deformations between 0.5-2.25 mm), which indicates a greater durability of the pellets.

Keywords: Fallen leaves, densification, pellets, energy use.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la producción de residuos se asocia con el crecimiento de la población (Medina Jimenez et al., 2017). La producción de desechos en Medellín es de aproximadamente 1800 ton/día, con una tasa de generación per cápita de alrededor de 0.45 kg/habitante/día. La producción total de desechos debido a zonas verdes y jardines es de aproximadamente 4.5%. Por lo tanto, una de las alternativas renovables de mayor potencial es el uso de biomasa residual como fuente de energía (Larochelle et al., 2012). El uso de hojarasca obtenida a partir de residuos municipales como materia prima para la conversión energía aumenta el valor de los desechos y reduce el impacto ambiental asociado a su eliminación y emisiones de CH_4 y CO_2 (García-Maraver et al., 2012)(William et al. , 2015). Generalmente, las ciudades recogen hojas caídas para quemarlas o depositarlas en rellenos sanitarios, aunque en muchos casos se usan en procesos de compostaje para generar un fertilizante orgánico a partir de la descomposición de la materia prima y la liberación de gases volátiles (Piepenschneider et al., 2016)(Bhange et al., 2012). El proceso de compostaje tiene un factor de emisión de aproximadamente 95-265 $g_{CO2}/kg_{residuos}$, mientras que los procesos de conversión termoquímicos de biomasa generan alrededor de 80 $g_{CO2}/kg_{residuos}$ de residuos, es decir, hay una reducción entre el 15% y el 70% de las emisiones contaminantes si la hojarasca residual se tratan en procesos de generación de energía en lugar de compostaje (Andersen et al., 2010)(Zhang et al., 2000).

Los jardines del campus principal de la Universidad de Antioquia (Colombia) producen alrededor de 2.8 toneladas de hojarasca seca por mes. Este desecho se utiliza en la Universidad para producir compostaje, que se utiliza como fertilizante en los jardines del campus. Actualmente, se está generando un exceso de abono orgánico, por lo que la Universidad ha decidido contratar empresas externas para recolectar y disponer los residuos forestales generados (Figura 1). En el presente trabajo se realiza un estudio de factibilidad técnica de la densificación de hojarasca residual para aplicaciones energéticas a través de conversión termoquímica.



Figura 1. Hojarasca residual apilada para compostaje en la Universidad de Antioquia

Tabla 1. Propiedades físicas de los pellets

Pellet	Dureza [Shore D]	ρ [kg·m^{-3}]	ρ_p [kg·m^{-3}]	PF [-]	D_{eq} [mm]	Ψ [-]	S/V [mm^{-1}]
M10-G00	49.0±4.3	524.7±5.6	1102.07±32.2	0.48	14.4±1.6	0.78±0.04	2.36±0.64
M15-G00	27.8±2.0	477.6±10.6	1076.72±35.7	0.44	12.7±0.9	0.84±0.02	1.60±0.30
M20-G00	29.8±4.4	452.7±13.8	1029.81±20.6	0.44	14.5±1.2	0.80±0.03	2.10±0.35
M10-G05	25.2±3.2	461.5±9.0	980.21±8.7	0.47	12.5±1.1	0.84±0.03	1.51±0.38
M15-G05	18.0±2.3	420.4±2.6	946.47±20.1	0.44	13.1±0.8	0.84±0.02	1.48±0.19
M20-G05	22.2±2.0	394.6±10.8	942.03±25.4	0.42	14.9±1.1	0.79±0.03	2.07±0.40
M10-G10	17.2±1.7	370.1±6.0	887.16±17.1	0.42	13.5±0.75	0.84±0.02	1.53±0.22
M15-G10	18.7±2.1	430.1±7.1	948.51±29.6	0.45	13.8±1.1	0.82±0.03	1.68±0.31
M20-G10	22.5±1.9	406.6±4.8	923.19±9.1	0.44	15.8±1.1	0.77±0.03	2.39±0.42

2. METODOLOGÍA

Las etapas para desarrolladas en el método de trabajo se describen a continuación:

Aforo: debido a las estaciones climáticas de Medellín, se decidió realizar mediciones en los meses de mayor precipitación y de menor brillo solar (mayo y octubre) y los meses de menor precipitación y mayor brillo solar (enero y julio). La medición permite determinar la cantidad de hojarasca producida en la universidad y su contenido de humedad. Además, las muestras de hojarasca se recolectan de manera aleatoria en cada temporada. Las muestras recolectadas se muelen, se mezclan y se secan a temperatura ambiente para la caracterización de la biomasa y la producción del combustible densificado.

Preparación y caracterización de los gránulos: la preparación de gránulos se basa en el diseño experimental estadístico multifactorial 3^2. El contenido de humedad es el primer parámetro experimental. Los tres niveles del contenido de humedad (base masa) son: 10%, 15% y 20%. El segundo factor considerado en el diseño experimental es el contenido de glicerina (base masa) como aglutinante. Para este factor, se seleccionan tres niveles (0%, 5% y 10%). La producción de pellets se realizó con una máquina peletizadora de rodillos de 3,75 kW, con un diámetro nominal de orificios de 8 mm, y con una capacidad de 30-40 kg/h.

Los pellets producidos se caracterizan por análisis físicos y termoquímicos para analizar su calidad como biocombustible sólido. Las propiedades físicas analizadas son: densidades aparente y de partícula, factor de empaquetamiento, diámetro equivalente, esfericidad, relación superficie/volumen, dureza, resistencia a la tracción, durabilidad y microscopía electrónica de barrido (SEM). El análisis termoquímico se realizó mediante análisis próximo, último y bioquímico, reactividad, poder calorífico y densidad de energía.

3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra las propiedades físicas de diferentes pellets. La densidad aparente disminuye con el aumento de los contenidos de humedad y glicerol. Una tendencia similar se muestra en la densidad de la partícula y el factor de empaquetamiento. El diámetro equivalente, la esfericidad y la relación superficie/volumen evalúan la relación de aspecto de los pellets, por lo tanto, un pellet con una forma cilíndrica más definida tiene un diámetro equivalente mayor y una relación superficie/volumen, y además una esfericidad menor.

La resistencia a la tracción de los pellets se encuentra entre 220-240 kPa, se obtuvo a partir de la fuerza de compresión. La Figura 2 muestra que con el aumento del contenido de humedad y glicerol hay un aumento en la resistencia a la

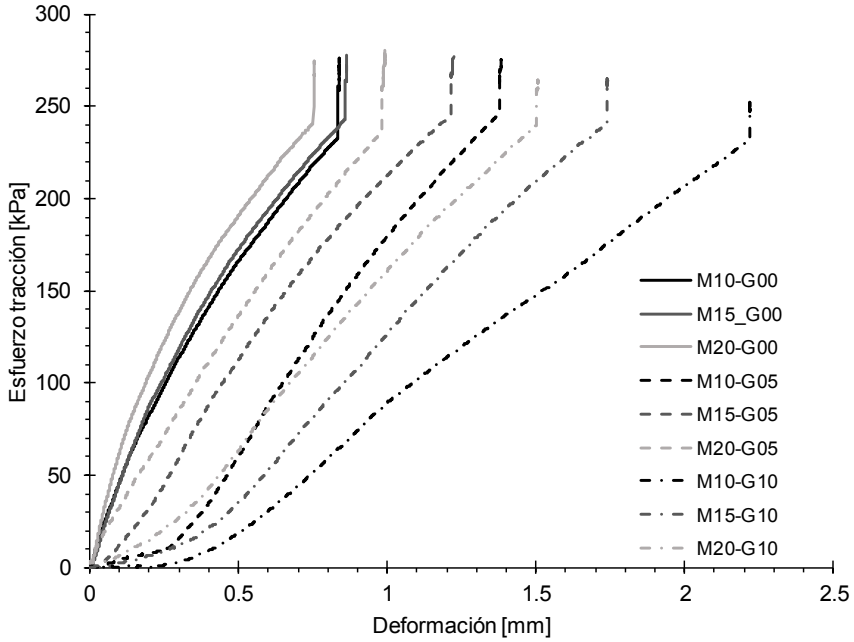


Figura 2. Esfuerzo a tracción

tracción. También es evidente que, con el aumento en el contenido de glicerol, los pellets tienen una mayor capacidad de deformación.

El análisis próximo muestra variaciones significativas con el aumento en el contenido de humedad (ver Tabla 2). El contenido de material volátil disminuye, mientras que el contenido de carbono fijo aumenta. Este comportamiento se debe al hecho de que al aumentar el contenido de humedad se requiere un aumento en la temperatura de la biomasa para alcanzar la densificación, esto implica un mayor número de recirculaciones de la materia prima en la pelletizadora. Por lo tanto, la liberación de gases volátiles se ve favorecida durante el proceso de densificación. El nivel de calentamiento de las muestras de biomasa aumenta a un mayor contenido de glicerol.

Tabla 2. Análisis proximo y poder calorífico superior

Fuel	Análisis próximo [% wt. d.b]			Humedad	PCS
	VM	FC	Ceniza	[%]	[MJ·kg^{-3} d.b]
Hojarasca molida	62.86	11.46	15.73	10.01	14.87
M10-G00	69.04	10.33	20.63	8.82	15.05
M15-G00	65.44	11.63	22.93	12.49	14.85
M20-G00	63.90	12.47	23.64	17.10	14.20
M10-G05	72.09	9.92	17.99	8.69	15.54
M15-G05	67.22	12.24	20.55	11.57	14.86
M20-G05	61.68	13.26	25.06	16.89	13.84
M10-G10	68.04	13.04	18.92	9.57	15.25
M15-G10	67.32	9.11	23.57	12.33	14.49
M20-G10	67.40	11.45	21.15	17.24	14.85

El análisis de reactividad (Figura 3) muestra que con el aumento del contenido de glicerol, se genera un hombro a una temperatura aproximada de 150 ºC, la degradación de la hemicelulosa se observa entre 250-280 ºC, el pico máximo que corresponde a la celulosa se da a 320ºC y la degradación de la lignina se presenta entre 360-380 ºC.

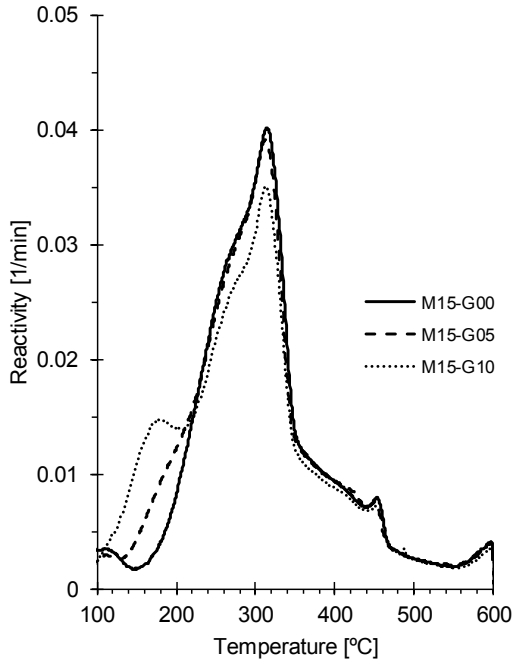


Figura 3. Reactividad

Ésta biomasa ($CH_{1.49}O_{0.44}N_{0.03}S$) en promedio posee un poder calorífico inferior en base seca de 13 MJ/kg, estas propiedades hacen viable este material biomásico para ser utilizado en procesos de generación de energía a pequeña escala (<50 kWe), cuyas plantas están configuradas por sistema de gasificación-motor-generador con una eficiencia global de 15% a 20%; se estima que una planta operando 8 hr/día usando esta biomasa como combustible renovable tendría un potencial que varía entre 7 kWe y 9 kWe para la Universidad.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas de la biomasa peletizada evalúan el comportamiento estructural y la calidad del almacenamiento de combustible; además, estos parámetros describen la adaptación y el comportamiento de los pellets utilizados para la recuperación de energía en lechos empacados en procesos termoquímicos. Las propiedades termoquímicas evalúan la calidad del combustible como recurso renovable a partir de los desechos y evaluar los diferentes cambios composicionales que sufre la materia prima al ser tratada en un proceso de peletizado (sometida a presión y temperatura).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero a la Universidad de Antioquia a través del proyecto CODI “Evaluación energética y emisiones de una estufa eco-eficiente para cocción basada en micro-gasificación de biomasa a escala domiciliaria. - PRG2017-16230”.

6. REFERENCIAS

Andersen, J. K., Boldrin, A., Christensen, T. H., & Scheutz, C. (2010). Greenhouse gas emissions from home composting of organic household waste. *Waste Management*, *30*(12), 2475–2482.

Bhange, V. P., Prince, S. P. M., Vaidya, A. N., & Chokhandre, A. R. (2012). Green Waste As a Resource for Value Added Product Generation : A Review, *4*(1), 22–33.

García-Maraver, A., Zamorano, M., Ramos-Ridao, A., & Díaz, L. F. (2012). Analysis of olive grove residual biomass potential for electric and thermal energy generation in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(1), 745–751.

Larochelle, L., Turner, M., & LaGiglia, M. (2012). Evaluation of NAMA opprtunities in Colombia’s solid waste sector. Washington.

Medina Jimenez, A. C., Nordi, G. H., Palacios Bereche, M. C., Bereche, R. P., Gallego, A. G., & Nebra, S. A. (2017). Evaluation of two different alternatives of energy recovery from municipal solid waste in Brazil. *Waste Management & Research*, 1–12.

Piepenschneider, M., Bühle, L., & Wachendorf, M. (2016). Solid Fuel Generation from Urban Leaf Litter in Mixture with Grass Cuttings: Chemical Composition, Energetic Characteristics, and Impact of Preprocessing. *BioEnergy Research*, *9*(1), 57–66.

William, S. P. M. P., Bhange, V. P., William, S. P. M. P., Suke, S. G., & Vaidya, A. N. (2015). Quantification and evaluation of garden biomass in municipal solid waste of Nagpur city : A case study, *14*(2), 326–331.

Zhang, J., Smith, K. ., Ma, Y., Ye, S., Jiang, F., Qi, W., … Thorneloe, S. . (2000). Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. *Atmospheric Environment*, *34*(26), 4537–4549.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

CARACTERIZACIÓN DEL BIOCARBÓN SUBPRODUCTO DE LA GASIFICACIÓN EN LECHO FIJO COMO COMBUSTIBLE Y ENMENDADOR DE SUELOS

CHARACTERIZATION OF WOOD BIOCHAR FROM FIXED BED GASIFICATION AS A FUEL AND SOIL AMENDMENT

Hernan E. Díez[*], William A. González[*]
Juan F. Pérez[*]

[*] **Universidad de Antioquia,** Facultad de ingeniería, Grupo GIMEL.
Calle 67 # 53-10, Medellín, Antioquia, Colombia.
Teléfono: +57 4 219 5550
E-mail: hernan.diez@udea.edu.co
williama.gonzalez@udea.edu.co
jfernando.perez@udea.edu.co

Resumen: En este trabajo se estudian los efectos del tipo de biomasa y del flujo de aire sobre las propiedades como enmendador de suelos de un subproducto sólido (biochar, BC) producido por gasificación en un reactor de lecho fijo. Los resultados indican que la biomasa con el índice de valor de combustible más alto produce BC con la más alta calidad como combustible sólido. Gua-30-BC logra las mejores propiedades como enmendador de suelos de la siguiente manera: su capacidad de intercambio catiónico (CEC) es de 18,6 meq / 100g, la capacidad de retención de agua (WHC) es de 438% y el carbono orgánico total oxidable (TOC) de 14.2%. Cuando el flujo de aire aumenta de 20 a 40 L / min, las propiedades del pino BC como combustible sólido se ven afectadas. Un aumento en la temperatura de gasificación conduce a una disminución de la densidad aparente. Además, el contenido de cenizas aumenta; esto afecta el poder calorífico de BC, que disminuye de 27.71 a 25.5 MJ / kg. Las mejores propiedades de BC como combustible sólido se alcanzan a 20 L / min. Las propiedades de BC como enmendador de suelos se ven afectadas a un mayor flujo de aire de la siguiente manera: el CEC disminuye un 22.8%, el TOC aumenta un 232.3% y el WHC aumenta un 7.6%. Las mejores propiedades de BC como enmendador de suelos se obtienen a 40 L / min.

Palabras clave: Biocarbón, gasificación de biomasa, subproducto sólido, combustible sólido, enmendador de suelos.

Abstract: In this work, the effects of biomass type and airflow on the fuel and soil amendment properties of a solid byproduct (biochar, BC) produced by gasification in a top-lit-updraft reactor are studied. The results indicate that biomass with the highest fuel value index produces BC with the highest quality as a solid fuel. The best properties as a soil amendment are reached by Gua-30-BC as follows: the cation-exchange capacity (CEC) of 18.6 meq/100g, the water holding capability (WHC) of 438%, and the total oxidizable organic carbon (TOC) of 14.2%. When the airflow increases from 20 to 40 L/min, the properties of pine BC as solid fuel are affected. An increase in the gasification temperature leads to a diminished bulk density. Moreover, the ash content increases; this

affects the heating value of BC, which decreases from 27.71 to 25.5 MJ/kg. The best properties of BC as a solid fuel are reached at 20 L/min. The properties of BC as a soil amendment are affected with increased airflow as follows: the CEC decreases by 22.8%, TOC increases by 232.3%, and WHC increases by 7.6%. The best properties of BC as a soil amendment are obtained at 40 L/min.

Keywords: Biochar, biomass gasification, solid byproduct, solid fuel, soil amendment.

1. INTRODUCTION

Reverse downdraft gasifiers are used in the development of biomass cookstoves due to their relative simple design and low cost (Jetter et al., 2012; Tryner, Willson, & Marchese, 2014; Vaughn et al., 2015). These reactors are also commonly used at laboratory scale to study the downdraft biomass conversion in the fixed bed reverse mode. Such experimental setups allow analysis of the thermochemical processes of carbon-based materials under gasification (fuel-rich conditions) and combustions regimes (fuel-lean conditions) from an empirical point of view (González et al., 2018)(Kirch et al., 2016). For biomass cookstoves, the main product is the producer gas for cooking meals (Njenga et al., 2016), while biochar is a carbonaceous matrix byproduct that can be used for different applications such as energy or as a soil amendment (Birzer et al., 2014). From the environmental point of view, biochar produced from biomass gasification can be used in the domestic context with the aim to contribute to sustainability. Therefore, it is important to understand the properties of biochar produced from a fixed bed reactor and potential applications of this byproduct such as serving as a solid biofuel or a soil amendment (Gomez-Eyles et al., 2013; Hagner et al., 2015; Vaughn et al., 2015).

2. MATERIALS AND METHODS

Biochar (BC) was produced using a laboratory scale reverse downdraft reactor. The effect of feedstock on the BC characteristics was evaluated using four wood species from some representative Colombian regions. Furthermore, the effect of the airflow rate (20, 30, and 40 L/min) of gasification on BC properties was evaluated using *Pinus patula*. This feedstock was selected due to its high quality as a solid biofuel that is quantified by the fuel value index (FVI, 9.89 MJ/cm^3). The four biomass species studied in this work are representative forest species from Colombia. The wood species are *Guazuma umlifolia*, Raw-Gua; *Cordia alliodora*, Raw-Nog; *Eucalyptus grandis*, Raw-Euc; and *Pinus patula*, Raw-Pat.

2.1. Experimental setup

BCs were produced in an experimental facility with a TLUD gasifier at the laboratory scale (Figure 1) working at atmospheric pressure. The reactor mainly had an internal diameter of 102 mm, an external diameter of 185 mm, and a bed length of 400 mm. A description of the experimental setup is presented in detail in previous works (Díez, Gómez, & Pérez, 2018; González et al., n.d.; Lenis, Agudelo, & Pérez, 2013). The behaviour of this reactor is similar to that of TLUD cookstoves operating only with primary air. Fresh biomass was ignited at the top, and the reaction front consisted of drying, pyrolysis, combustion and reduction stages, going down until reaching the grate (Tryner et al., 2014). This reaction front is known as an autothermal pyrocombustion front (Pérez et al., 2015; Pérez et al., 2012). Gasification parameters such as the biomass consumption rate, the maximum reaction temperature, and BC production can be obtained under controlled conditions. The obtained results can be extrapolated to improve the performance of gasifiers and TLUD cookstoves (Díez et al., 2018; James et al., 2016).

2.2 Biochar characterization

The biochars samples have been characterized by proximate, ultimate and thermogravimetric analyses, bulk density, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), surface area (Brebauer–Emmett–Teller (BET) method), CEC (meq/100g), WHC , pH, and ash chemical composition. The results were focused to define potential applications for biochar in the rural context of fixed bed gasifiers, because biomass TLUD

cookstoves at a domiciliary scale produce a low amount of biochar that varies between 8% to 10% of mass yield (James R. et al., 2016; Ok et al., 2016).

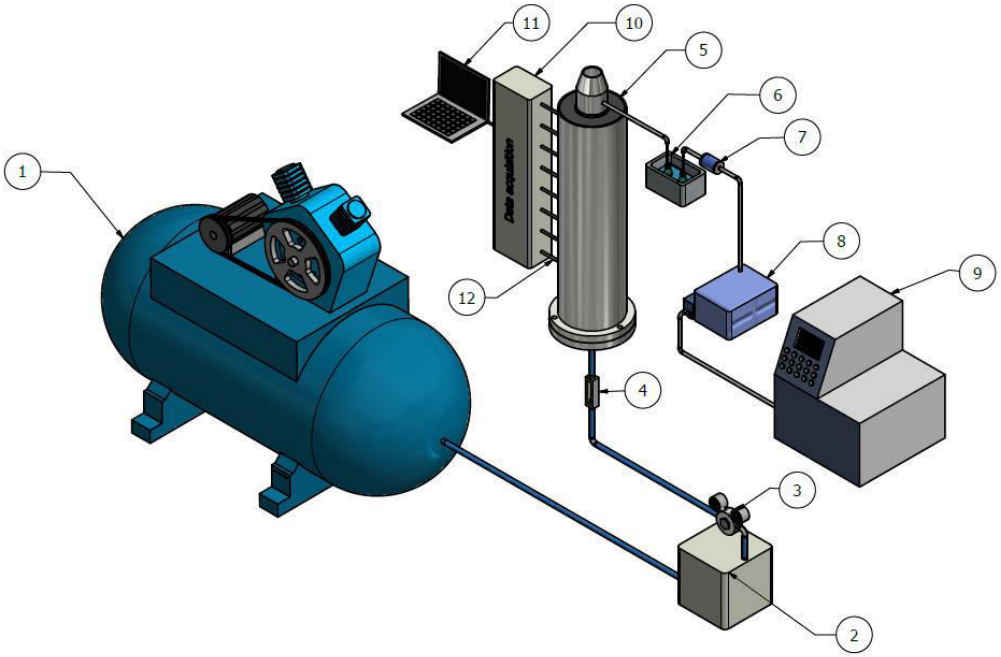


Figure 1. Experimental setup: 1. Reciprocating compressor; 2. Plenum; 3. Flow regulator; 4. Rotameter; 5. TLUD reactor; 6. Gas conditioning; 7. Filter; 8. Vacuum pump; 9. Chromatograph; 10. Data acquisition; 11. Computer; 12. K-type thermocouples.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In relation to the operating parameters of the gasification process, the production of biochar was significantly affected by the reaction temperature. As the reaction temperature increased, the production of biochar decreased due to the favored gasification reactions; therefore, the carbon conversion increased. On the other hand, the biochar as a solid fuel for cooking in TLUD cookstoves could benefit the performance of the process, this is attributed to its good properties as a fuel, such as high heating value, low moisture content, and higher thermal stability. The LHV of the biochar produced increases due to the thermal degradation of hemicellulose and cellulose in the gasification process; thereby, the solid byproduct has high lignin content. The thermal degradation of the biomass constituents was reflected in the infrared spectra, where the peaks between 1200 cm^{-1} and 1000 cm^{-1}, attributed to C-O-C present in the hemicellulose and cellulose, decreased.

In relation with the effect of the biomass type on biochars properties as solid fuel, it was found that the biomass with the highest FVI produced the biochar with the highest FVI; this solid fuel quality rises for the low ash content (1.6% wt) and high heating value (27.46 MJ/kg) of Pat-30-BC. In contrast, the low FVI of Gua-30-BC (0.20 MJ/cm^3) and Nog-30-BC (0.52 MJ/cm^3) reached were due to their high ash contents. The main properties of BCs are presented in Table 1. The surface area of the biochars, in relation to raw biomass, increase due to the release of the volatile matter.

With regard to the effect of the air flow on the properties of the patula pine biochars, in Table 1 is shown that if air flow increases, the volatile matter decreases and fixed carbon increases because the gasification process slightly tends to combustion, thereby, a high gasification temperature favors the chemical reactions. However, the FVI decreased 57.5% as the air flow increased from 20 l/min to 40

l/min, since Pat-40-BC has the lowest bulk density due to the highest release of volatile matter and a high ash content (4.72% wt.) that affect the LHV with a reduction (25.5 MJ/kg).

Table 1. Biochar physicochemical characterization.

Wood biochars							
	Feedstock type effect				Airflow effect		
	Gua-30	Nog-30	Euc-30	Pat-30	Pat-20	Pat-30	Pat-40
Proximate analysis d.b. (%wt.)							
VM	11.96	13.20	7.23	14.25	16.55	14.25	11.46
FC	78.04	76.10	89.51	84.15	81.22	84.15	86.18
Ash	10.00	10.70	3.26	1.60	2.23	1.60	2.36
Aromatic index (--)	0.867	0.852	0.925	0.855	0.830	0.855	0.883
Moisture (%wt.)	7.30	3.30	2.88	3.69	2.86	3.69	4.72
Ultimate analysis d.a.f. (%wt.)							
C	87.57	83.40	75.72	82.92	81.67	82.92	81.91
H	0.47	0.60	0.87	0.21	1.39	0.21	0.47
O	9.94	15.99	23.39	16.83	16.91	16.83	17.59
N	2.02	0.01	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03
S	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Energy properties							
$LHV_{d.b}$ (MJ/kg)	23.22	23.41	27.49	27.46	27.71	27.46	25.50
FVI (MJ/cm^3)	0.20	0.52	2.84	4.30	3.20	4.30	1.36
Physical properties							
BET (m^2/g)	260.40	298.86	348.49	318.32	258.93	318.32	431.78
Pore volume (cm^3/g)	0.0668	0.0578	0.0620	0.0488	0.0262	0.0488	0.1022
Bulk density (kg/m^3)	64.10	77.80	97.14	92.33	91.62	92.33	58.85

The studied biochars present properties as a soil amendment lower than suggested by technical Colombian standard (NTC 5761). The standard requires that a soil amendment meet the following requirements: CEC > 30 meq/100g, organic carbon > 25%, moisture content < 20%, and the heavy metal content of As < 41 ppm, Cd < 39 ppm, Cr < 1200 ppm, Hg < 17 ppm, Ni < 420 ppm, and Pb < 300 pmm. Thus, not all biochars studied in this work fulfil the requirements for CEC and organic carbon parameters. These results suggest that the biochar produced from fixed bed gasification could be used as a soil amendment, but the biochar requires treatments for improving its properties; for instance, mixing biochar and compost could be an excellent solution for rural sustainability (Kisiki Nsamba, Hale, Cornelissen, & Bachmann, 2015). Herein, the biochar samples characterized as a soil amendment require future research focusing on improving their properties to fulfil the NTC 5761 standard. Gaskin et al. (Gaskin, Steiner, Harris, Das, & Bibens, 2008) stated that post-production treatments for biochars are required to increase the immediate benefits of biochar on the soil for applications in agriculture. For example, mixing biochar with a soil amendment or fertilizer will improve CEC and organic carbon content (Gaskin et al., 2008).

4. CONCLUSIONS

The solid byproduct from biomass TLUD gasification, biochar, is suitable to be used as a solid fuel or as a soil amendment.

The promoted thermal degradation of biomass constituents (hemicellulose and cellulose) with a high reaction temperature leads to a decrease in the bulk density of BCs. Therefore, the convergence of the high ash content and the low bulk density leads to a decrease in FVI and LHV. As the airflow rate increases, the FVI and LHV decreases from 3.2 MJ/cm^3 to 1.36 MJ/cm^3, and from 27.71 MJ/kg to 25.5 MJ/kg, respectively.

The presence of macronutrients and micronutrients in biochar and properties such as CEC, TOC, and WHC suggest the suitability of BCs for soil amendment applications. However, further studies are required to improve the properties of BCs as a soil amendment.

5. Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of CODI-Universidad de Antioquia through the research project “Energy evaluation and emissions of an eco-efficient cookstove based on biomass micro-gasification at household scale (in Spanish) - PRG2017-16230”.

6. REFERENCES

Birzer, C., Medwell, P., MacFarlane, G., Read, M., Wilkey, J., Higgins, M., & West, T. (2014). A Biochar-producing, Dung-burning Cookstove for Humanitarian Purposes. *Procedia Engineering*, *78*, 243–249.

Díez, E., Gómez, I., & Pérez, J. (2018). Mass, energy, and exergy analysis of the microgasification process in a top-lit updraft reactor: effects of firewood type and forced primary airflow. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *29*, 82–91.

Gaskin, J., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C., & Bibens, B. (2008). Effect of Low-Temperature Pyrolysis Conditions on Biochar for Agrucultural Use. *Transactions of the Asabe*, *51*(6), 2061–2069.

Gomez-Eyles, J., Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Ghosh, U., & Sizmur, T. (2013). *Biochar and Soil Biota: The Potential of Biochar Amendments to Remediate Contamined Soils*. (N. Ladygina & F. Rineau, Eds.). Boca Raton, FL: CRC press.

González, W. A., Pérez, J. F., Chapela, S., & Porteiro, J. (n.d.). Numerical Analysis of Wood Biomass Packing Factor in a Fixed-bed Gasification Process. *Renewable Energy*.

Hagner, M., Hallman, S., Jauhiainen, L., Kemppainen, R., Rämö, S., Tiilikkala, K., & Setälä, H. (2015). Birch (Betula spp.) wood biochar is a potential soil amendment to reduce glyphosate leaching in agricultural soils. *Journal of Environmental Management*, *164*, 46–52.

James R., M. A., Yuan, W., & Boyette, D. M. (2016). The Effect of Biomass Physical Properties on Top-Lit Updraft Gasification of Woodchips. *Energies* .

Jetter, J. J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, M. D. (2012). Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Enviromental Science and Technology*, *46*, 10827–10834.

Kirch, T., Medwell, P. R., & Birzer, C. H. (2016). Natural draft and forced primary air combustion properties of a top-lit up-draft research furnace. *Biomass and Bioenergy*, *91*, 108–115.

Kisiki Nsamba, H., Hale, S. E., Cornelissen, G., & Bachmann, R. T. (2015). Designing and Performance Evaluation of Biochar Production in a Top-Lit Updraft Upscaled Gasifier. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*.

Lenis, Y. A., Agudelo, A. F., & Pérez, J. F. (2013). Analysis of statistical repeatability of a fixed bed downdraft biomass gasification facility. *Applied Thermal Engineering*, *51*(1–2), 1006–1016.

Njenga, M., Iiyama, M., Jamnadass, R., Helander, H., Larsson, L., de Leeuw, J., … Sundberg, C. (2016). Gasifier as a cleaner cooking system in rural Kenya. *Journal of Cleaner Production*, *121*, 208–217.

Ok, Y., Uchimiya, S., Chang, S., & Bolan, N. (2016). *Biochar: Production, characterization, and applications*. (T. & F. Group, Ed.).

Pérez, J. F., Benjumea, P. N., & Melgar, A. (2015).

Sensitivity analysis of a biomass gasification model in fixed bed downdraft reactors: Effect of model and process parameters on reaction front. *Biomass and Bioenergy*, *83*, 403–421.

Pérez, J. F., Melgar, A., & Benjumea, P. N. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, *96*, 487–496.

Tryner, J., Willson, B. D., & Marchese, A. J. (2014). The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves. *Energy for Sustainable Development*, *23*, 99–109.

Vaughn, S. F., Kenar, J. A., Eller, F. J., Moser, B. R., Jackson, M. A., & Peterson, S. C. (2015). Physical and chemical characterization of biochars produced from coppiced wood of thirteen tree species for use in horticultural substrates. *Industrial Crops and Products*, *66*, 44–51.

Metodología de diseño y validación CFD de una turbina de flujo cruzado tipo Michell-Banki

Design methodology and CFD validation of cross-flow turbine type Michell-Banki

Galvis S.H.[*], Sierra J.[**], Del Gallego Rico Mateo[**], Giraldo D.[**], Sanín D. [**]

[*] **Instituto Tecnologico Metropolitano,** Facultad de ingeniería, Programa ingeniería Mecatrónica.
Dirección, Medellín, Antioquia, Colombia.
3045959792,57
E-mail: stevengalvis221631@correo.itm.edu.co.
[**] **Instituto Tecnologico Metropolitano,** Facultad de ingeniería.
E-mail: jorgesierra@itm.edu.co
E-mail: danielsanin@itm.edu.co
E-mail: mateodel205229@correo.itm.edu.co
E-mail: danielgiraldo209012@correo.itm.edu.co

Resumen: Las pequeñas centrales hidroeléctricas - PCH´s - se utilizan principalmente en las zonas no interconectadas – ZNI - del país donde la densidad poblacional y el consumo de energía son bajos, por lo que la provisión de energía eléctrica desde el sistema interconectado no resulta factible económicamente. Por lo tanto, las ZNI donde se tienen disponibilidad de recursos hídricos, son los principales puntos de aplicación de las turbina de flujo cruzado - TFC -. El objetivo de este estudio consiste en realizar una metodología para el diseño de una TFC tipo Michell-Banki de alta eficiencia validándola numéricamente mediante un análisis de fluidos computacional –CFD-. En este estudio se realizó una investigación rigurosa de la literatura de las TFC tipo Michell-Banki, donde se determinan los parámetros y ecuaciones más influyentes de diseño en la eficiencia máxima de la TFC. Luego, se realiza el diseño de esta turbina en el programa comercial SolidWorks con los mejores parámetros encontrados en la literatura y por último, se valida el diseño de la turbina Michell-Banki mediante CFD en el módulo CFX del programa comercial Ansys19.0®, utilizando un modelo cuasi 2D y simulaciones transitorias. Se concluye que la metodología de diseño realizada para el dimensionamiento de cada uno de los elementos que componen la TFC tipo Michell-Banki, fue validada numéricamente utilizando técnicas CFD y alcanzó eficiencias por encima del 80%.

Palabras clave: turbomáquinas, pico-hidroeléctricas, eficiencia, dinámica de fluidos computacional.

Abstract: The small hydroelectric plants –SHP- are mainly located in the non-interconnected zones - NIZ - of the country where population density and energy consumption are low, so the provision of electricity from the interconnected system is not economically feasible. Therefore, the NIZ where there water resources are available, are the main points of application of the cross-flow turbine - CFT -. The objective of this

study is to carry out a methodology for the design of a CFT type Michell-Banki of high efficiency validating it numerically by means of a computational fluid analysis -CFD-. In this study, a rigorous investigation of the literature of the CFT type Michell-Banki was made, where the parameters and the most influential equations of the design in the maximum efficiency of the TFC are determined. Then, the design of this turbine is made in the commercial program SolidWorks with the best parameters found in the literature and finally, it validates the design of the Michell-Banki turbine by means of CFD in the CFX module of the commercial program Ansys19.0®, using a quasi-2D model and transient simulations. It is concluded that the design methodology performed for the sizing of each of the elements that make up the TFC type Michell-Banki, was numerically validated using CFD techniques and achieved efficiencies above 80%.

Keywords: turbo-machines, pick-hydroelectric, efficiency, computational fluid dynamics.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la economía del mercado competitivo, la modernización y la población en constante crecimiento, la demanda de energía mundial está aumentando drásticamente. Diferentes estudios indican un gran aumento en el consumo de energía en las próximas décadas, especialmente en los países en desarrollo (Endashaw Tesfaye Woldemariam , Hirpa G. Lemu, 2018). En las últimas décadas se ha visto un mayor aumento en el consumo de energías renovables (Figura 1). Estos estudios proyectan que esta tendencia seguirá en el futuro. Entre otros, la principal fuente de energía renovable es la energía hidroeléctrica.

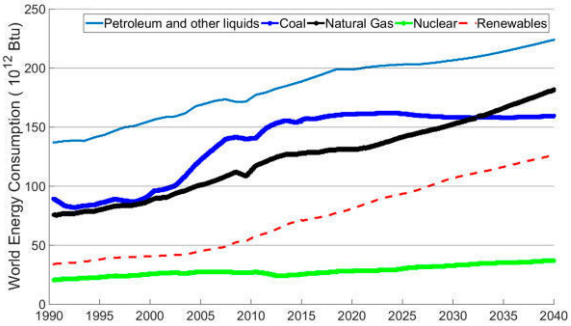


Figura 1. Historia y proyección del consumo en el mundo de las diferentes fuentes de energía. (Endashaw Tesfaye Woldemariam , Hirpa G. Lemu, 2018)

A partir de 2015, la energía hidroeléctrica constituye cerca del 61% del total de la energía renovable mundial. De éste, las pequeñas y micro centrales hidroeléctricas aportan alrededor de 7% y 4.5% (Figura 2), respectivamente. Las centrales hidroeléctricas con una capacidad de generación entre 100kW y 10 MW se clasifican en pequeñas centrales, mientras que las que tienen una capacidad de generación por debajo de 100kW se clasifican en micro-hidroeléctricas (Endashaw Tesfaye Woldemariam , Hirpa G. Lemu, 2018). La generación de energía por medio de hidroeléctricas es una de las opciones menos costosas (Summary, 2016)

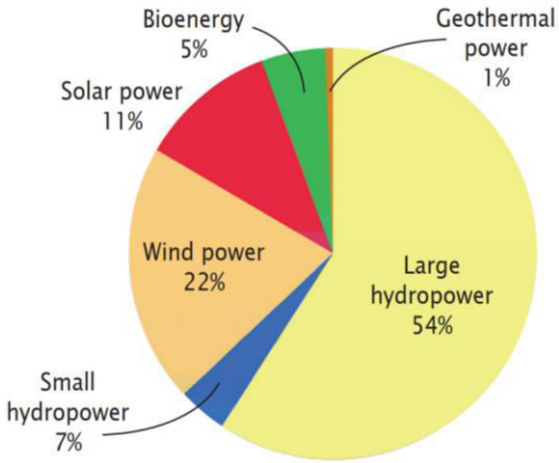


Figura 2. Cuota global de energías renovables. (Summary, 2016)

En la figura 3 se presenta un ábaco donde se muestran los rangos para la utilización de las diferentes turbinas hidráulicas según su caudal y cabeza. Como se puede apreciar en la figura 3, se encuentran zonas de funcionamiento compartidas entre 2 o más turbinas, caso en el que se utilizan criterios de selección según el presupuesto.

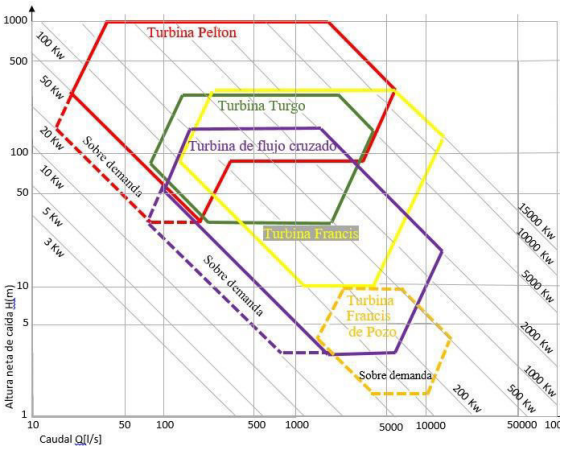


Figura 3. Abaco para selección de turbina según la potencia (Alfonso, Gutiérrez, Tur, & Banki, 2008).

En el potencial hídrico existente, las micro-hidroeléctricas y pequeñas hidroeléctricas constituyen porciones significativas, y tienen un papel importante en el aprovechamiento del potencial remanente, particularmente en las Zonas No Interconectadas en países en desarrollo. Este tipo de centrales hidroeléctricas son de suma importancia en la electrificación de las ZNI con impactos insignificantes en el ecosistema (Paish, 2002). Además, de las demás tecnologías sin conexión a la red nacional, representan aun la forma menos costosa de generación de electricidad (Summary, 2016).

Para aprovechar al máximo el potencial hidroeléctrico a pequeña escala existente, se requiere la utilización de equipos eficientes en las instalaciones hidroeléctricas. Las turbinas hidráulicas son una de las partes más críticas en la implementación de las centrales hidroeléctricas, podemos encontrar diferentes turbinas como Francis, Pelton, Kaplan y Michell-Banki, siendo la Turbina de Flujo Cruzado (TFC) tipo Michell-Banki la menos conocida y por tanto, menos utilizada (Alfonso et al., 2008), a pesar de sus ventajas comparativas como su simplicidad de diseño, bajo costo de fabricación y poca variación de su eficiencia debido a cambios en el caudal (Dragomirescu, 2016). Contrario a los diferentes enfoques de optimización realizados tanto experimentalmente como computacionalmente en las últimas décadas, las metodologías de diseños de las TFC deben ser actualizadas (Endashaw Tesfaye Woldemariam , Hirpa G. Lemu, 2018). Por lo tanto, una buena metodología de diseño para el dimensionamiento de la turbina Michell-Banki tendrá un impacto significativo en el rendimiento. Esta metodología debería de mostrar no sola la conversión eficiente de la energía cinética del fluido a energía mecánica, sino también definir, la geometría exacta de los álabes del rotor, las RPM de la turbina y la variación de esta última frente a cambios en las condiciones de funcionamiento (Zanette, Imbault, & Tourabi, 2010).

La TFC tipo Michell-Banki es una turbina de acción de flujo transversal y admisión parcial, sus principales elementos son: el inyector que regula y dirige el flujo del agua para que ingrese al rotor, mojando una determinada cantidad de álabes en la primera etapa, donde entrega el 70% de la energía, luego crea el denominado flujo cruzado y entrega el 30% de energía del flujo restante.

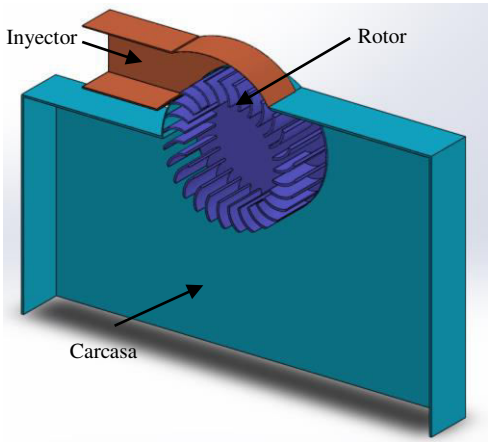


Figura 4. Turbina de flujo cruzado tipo Michell-Banki

En este aspecto, en la literatura se proponen algunos enfoques de optimización de diseño basados en estudios numéricos y experimentales. (Sammartano, Aricò, Carravetta, Fecarotta, & Tucciarelli, 2013) (Chichkhede, Verma, & Kumar, 2016) (Andri et al., 2017) (R. Adhikari & Wood, 2018) investigaron mediante análisis CFD 2D y 3D el diseño óptimo de las TFC tipo Michell-Banki basándose en criterios de mejora fundamentados en los parámetros de la geometría que afectan considerablemente la eficiencia de la turbina. El estudio reportado por (V. Sammartano, G.Morreale, M. Sinagra, A. Collura, 2014) reviso

mediante análisis CFD y pruebas experimentales una nueva fórmula que relaciona la velocidad de entrada a la presión de entrada del fluido al rotor probando el rendimiento de la turbina Michell-Banki en una amplia gama de caudales. (Mario Alfonso Arellano Vilchez, 2015) realizó un estudio utilizando técnicas CFD analizando el comportamiento de los álabes del rotor con y sin filo, además teniendo en cuenta el espesor de los álabes. (R. C. Adhikari & Wood, 2017) realizaron un estudio del efecto de la geometría de la pared posterior del inyector en la eficiencia de la TFC utilizando simulaciones computacionales y análisis CFD, concluyendo un aumento en la eficiencia final de la turbina y validando esta metodología con los resultados obtenidos experimentalmente por (Dakers A, 1982) y (Desai & Aziz, 1994). La investigacion realizada por (Popescu, 2017) analiza las bajas eficiencias de las TFC mediante CFD causadas por la interacción del fluido con el eje del rotor negativamente y las recirculaciones del fluido a bajas RPM. Por otro lado (Adanta, Siswantara, & Prakoso, 2018) elaboraron un nuevo estudio para verificar la incidencia de los parámetros geométricos de los álabes del rotor en la potencia de salida de la turbina Michell-Banki utilizando perfiles hidrodinámicos, los cuales son comparados con los perfiles estándar (tubulares) encontrando eficiencias para los nuevos perfiles del 47%, las cuales están por debajo de la eficiencia con perfiles estándar, esto puede deberse a que no se utilizaron estos perfiles con concavidades aproximadas a los perfiles de los álabes estándar. Con esto, se hace evidente la falta de estudios actualizados y específicos en la metodología de diseño que faciliten el dimensionamiento eficiente de cada uno de los componentes (Inyector, Rotor, Carcasa) de la TFC tipo Michell-Banki, con base a las condiciones de sitio (Caudal y Cabeza) que se tengan en el lugar de implementación.

El objetivo de este estudio consiste en validar numéricamente mediante simulación CFD, una metodología de diseño de TFC tipo Michell-Banki actualizada conforme a los nuevos resultados de metodologías de diseño de los diferentes elementos que la conforman.

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

2.1. ECUACIONES GUBERNAMENTALES

Para comenzar con el diseño se deben tener las condiciones de funcionamiento de la turbina, altura neta o cabeza y caudal. Para la turbina que se va realizar se tiene un caudal de Q= 19.24 L/s y una altura de H= 0.5 m. Se comienza diseñando el rotor de la turbina, para el cual se tiene los diámetros según la relación cabeza / caudal de la tabla 2, con el que se calcula la velocidad de rotación óptima del rotor con la Ecuación 1.

$Q/\sqrt{H}$	**Diámetro del rotor (mm)**
0,02236 - 0,04743	200
0,04743 - 0,07906	300
0,07906 - 0,11068	400
0,11068 – 0,15812	500

Tabla 2. Selección del diámetro del rotor.

$$\omega_{\max} = \frac{39.85 * \sqrt{H}}{D_{ext}} \quad (1)$$

Luego, se obtiene el diámetro interior del rodete con la ecuación 2 dada por (R. C. Adhikari & Wood, 2017).

$$0.68 = \frac{D_{\text{int}}}{D_{ext}} \quad (2)$$

Determinando el ángulo α_1 de incidencia del fluido al rotor, el cual se saca de la literatura siendo este el que ha dado mejor rendimiento en la turbina.
Se procede a determinar el ángulo de la velocidad relativa del fluido con respecto al rotor con la ecuación β_1.

$$\beta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{\sin\alpha_1}{(1-k_u(2-k_u)*\cos\alpha_1)^{0.5}}\right) \quad (3)$$

Donde K_u es el coeficiente de velocidad tangencial para la turbina de flujo cruzado, aproximadamente

de 0.5. A partir de los estudios realizados en la literatura se selecciona el β_2

Teniendo estos ángulos se tendrán los ángulos de los álabes con respecto a la tangente de los diámetros interiores y exteriores; β_{1b} y β_{2b}, respectivamente.

Luego, se procede a sacar el radio ecuación 4 y ángulo de curvatura de los álabes ecuación 5.

$$r = \frac{D_{ext}}{4\cos\beta_1} * \left(1 - \left(\frac{D_{\text{int}}}{D_{ext}}\right)^2\right) \quad (4)$$

$$\phi = 2\tan^{-1}\left(\frac{\cos\beta_1}{\left(\frac{D_{\text{int}}}{D_{ext}}\right) + \sin\beta_1}\right) \quad (5)$$

Luego, se obtiene el ancho del rotor con la ecuación 7.

$$W = \frac{Q * N_b}{\pi * D_{exr} * V_{in} * \sin\alpha_1 * Z_a} \quad (7)$$

Y por último C_0 que será la velocidad total del fluido en la entrada al rotor y será obtenido por la ecuación 8 (R. C. Adhikari & Wood, 2017), aplicando el principio de conversión de la cabeza a energía cinética.

$$g * H = \frac{C_o^{\,2}}{2} * \left(1 + \frac{h_0^{\,2}}{R_{ext}^{\,2} * \theta_s^{\,2}}\right) \quad (8)$$

Ya terminado el rotor, se procede al diseño del inyector, para éste se tienen unas relaciones óptimas constatadas en la literatura (R. C. Adhikari & Wood, 2017).

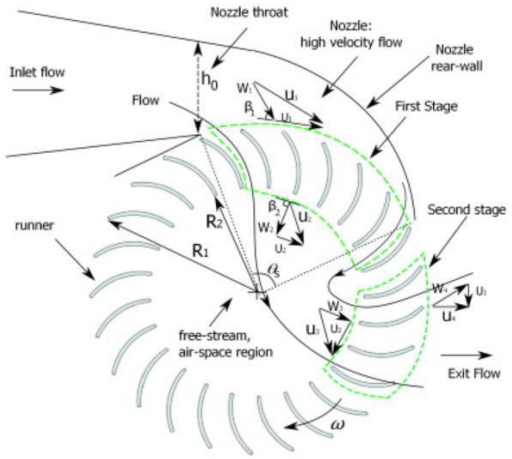


Figura 4. Ilustración esquemática del diseño básico de una turbina de flujo cruzado (R. C. Adhikari & Wood, 2017)

$$\frac{h_0}{R_{ext} * \theta_s} = 0.37 \quad (9)$$

$$\frac{B}{h_o} = 1.14 \quad (10)$$

$$B = \frac{W}{1.5} \quad (11)$$

Teniendo la velocidad del fluido, el caudal que pasara por la sección transversal del inyector y unos de los lados (B) se puede hallar el h_0 con la ecuación 12.

$$C_0 = \frac{Q}{B * h_0} \quad (12)$$

Finalmente, la última medida por calcular será el radio de curvatura del inyector a la entrada de la turbina, la cual se obtiene con la ecuación 13 dada por (R. C. Adhikari & Wood, 2017).

$$R_{(\theta)} = R_1 + h_0\left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right) \quad (13)$$

Donde θ será el ángulo que va variar desde ángulo de apertura del inyector a la entrada del rotor (θ_s).

Finalmente se obtiene el diseño final de la turbina presentado en la figura 5.

2.2. MODELO COMPUTACIONAL

Al obtener el diseño final, guiado por las ecuaciones gubernamentales que rigen a las TFC tipo Michell-Banki, se procede a realizar una operación booleana donde se obtiene el volumen de control, al cual se le hará una discretización o mallado en el módulo del programa comercial Ansys 19.0 ®; por medio de elementos tetraédricos, con funciones avanzadas de curvatura y proximidades, el tamaño mínimo de los elementos fue de 2 mm. El estudio de malla (figura 6), permitió determinar la independencia de malla para 310.000 elementos con un error relativo por debajo del 0.6%, obteniendo métricas de calidad ortogonal y oblicuidad aceptables.

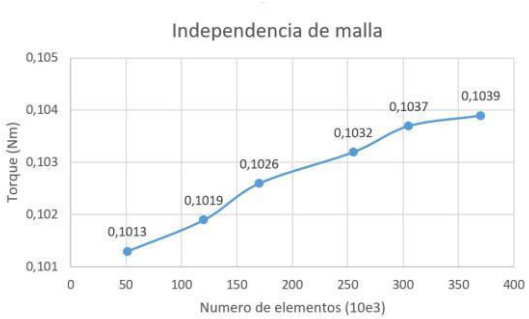


Figura 6. Independencia de malla.

Con base a las diferentes investigaciones donde comparan los diversos modelos de turbulencia en problemas similares y varios modelos computacionales, se encuentra que el modelo numérico estándar $k-\varepsilon$ representa el flujo dentro de la turbina de flujo cruzado. Según los estudios y de las guías de usuario de las herramientas de simulación, este modelo es robusto, económico y proporciona una precisión razonable no solo para el problema actual, sino también para una amplia gama de problemas. Por lo tanto, en este trabajo, hemos utilizado el modelo estándar $k-\varepsilon$ para los análisis dependientes del tiempo, empleando simulaciones transitorias con un tiempo de simulación de 1 segundo y con un time step de 0.001 segundos, considerando el modelo bifásico homogéneo compuesto por agua y aire a 25 °C, ya que este, tiene menor costo computacional que el no homogéneo. Además, se realizaron simulaciones cuasi 2D, para disminuir el tiempo de cómputo de 2 semanas a 1 día de simulación. Para la configuración del CFX el fluido entra al sistema por el inyector (Inlet) ver figura 7, con una velocidad de 2.3 m/s, luego pasa a través del anillo (Figura 8), el cual es configurado con dos interfaces entre los dominios estacionarios (Carcasa e inyector) y el rotativo (Rotor).

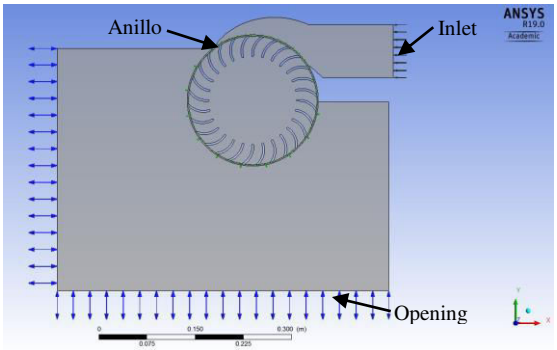


Figura 7. Configuración CFX de la TFC tipo Michell.Banki

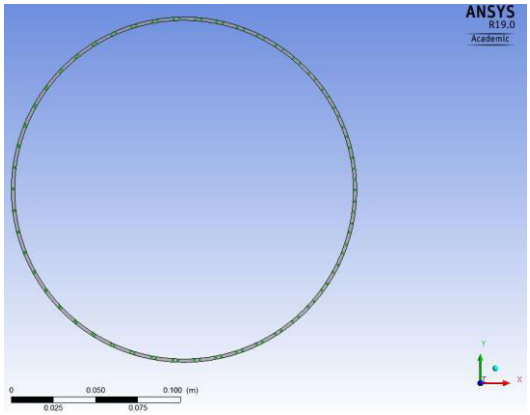


Figura 8. Dominio anillo

Por último, el fluido pasa a través del rotor generando el denominado flujo cruzado que caracteriza a las turbinas Michell-Banki ver figura 9.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primero, se compara el CFD con el resultado teórico de la eficiencia para el cual se obtiene una eficiencia de 80% con el estudio de malla realizado. Las principales características de los contornos de velocidad (Figura 10), presión (Figura 11) y fracción volumétrica (Figura 9) son examinadas para caracterizar la influencia de las

condiciones de flujo en el rendimiento de la turbina.

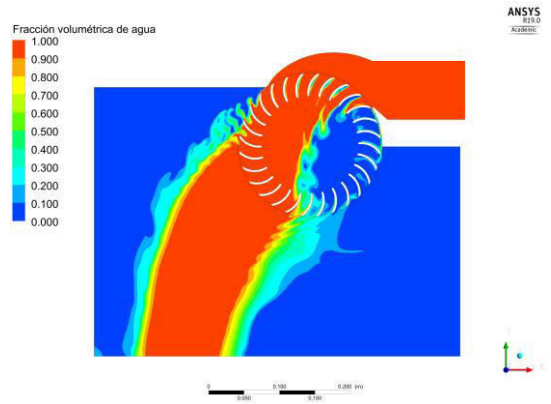


Figura 9. Fracción volumétrica de agua en TFC.

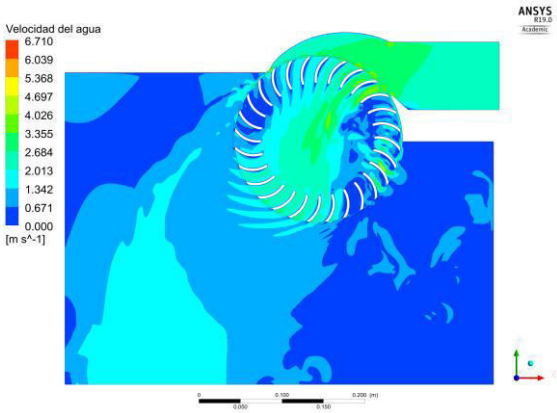


Figura 10. Velocidad del agua.

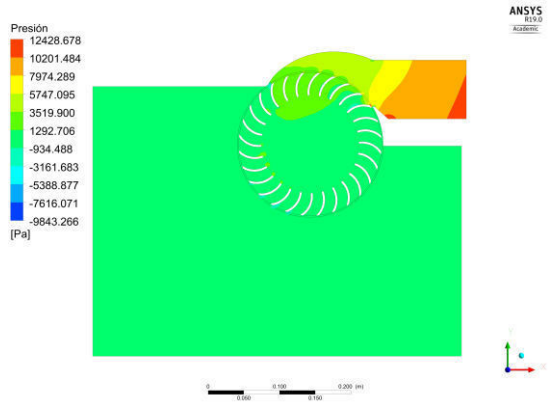


Figura 11. Contornos de presión manométrica.

En resumen, se puede evidenciar el contorno de presión en el plano de simetría producido por el flujo del fluido, cuando viaja a través de la turbina desde la entrada a la salida (opening), el valor asociado al color rojo indica la presión máxima generada por el agua y se observa en la entrada del inyector, mientras que el color azul representa una presión de vacío, que este tipo de turbinas no presentan, pero que para este caso esta diferencia de presión se presenta entre los lados cóncavos y convexo de los álabes del rotor, extrayendo así una mayor cantidad de energía del fluido, debido a la tendencia a rotar. Los contornos de velocidad del agua en diferentes puntos de la turbina, en la cual vemos un aumento de la velocidad en la reducción de la sección transversal y en el flujo cruzado en el rotor, por lo que el fluido proporciona mayor energía cinética en la primera y segunda etapa.

4. CONCLUSIONES

En este artículo, se proporcionó resultados prometedores con respecto a la mejora del rendimiento de la turbina de flujo cruzado. La motivación para el estudio es el hecho de que, en el estado del arte no se encontraron metodologías completas de diseño para las TFC.

La nueva metodología establecida en este trabajo permite, diseñar cada uno de los elementos de la turbina de flujo cruzado tipo Michell-Banki con eficiencias por encima del 80% con base a las condiciones de sitio (cabeza y caudal), acortando significativamente el tiempo requerido en esta etapa.

Se pudo realizar una independencia de malla con un número de elementos reducido utilizando simulaciones cuasi 2D, obteniendo resultados adecuados con tiempos de simulación cortos.

REFERENCIAS

Adanta, D., Siswantara, A. I., & Prakoso, A. P. (2018). Performance Comparison of NACA 6509 and 6712 on Pico Hydro Type Cross- Flow Turbine by Numerical Method Akademia Baru Journal of Advanced Research in Fluid Performance Comparison of NACA 6509 and 6712 on Pico Hydro Type Cross-Flow Turbine by Numerical Method, (May).

Adhikari, R. C., & Wood, D. H. (2017). A new nozzle design methodology for high efficiency crossflow hydro turbines. *Energy for Sustainable Development*, *41*, 139–148. http://doi.org/10.1016/j.esd.2017.09.004

Adhikari, R., & Wood, D. (2018). The Design of High Efficiency Crossflow Hydro Turbines : A Review and Extension. *Energies*, 1–18.

http://doi.org/10.3390/en11020267
Alfonso, C., Gutiérrez, P., Tur, D., & Banki, M. (2008). La turbina Mochell-Banki y su presencia en Colombia Resumen, 33–42.
Andri, I., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., & Corre, O. Le. (2017). An Experimental Investigation of the Performance of cross-flow hydro turbines. *Energy Procedia*, *141*, 630–634. http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.084
Chichkhede, S., Verma, V., & Kumar, V. (2016). A simulation based study of flow velocities across cross flow turbine at different nozzle openings, *25*(Raerest), 974–981. http://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.190
Dakers A, M. G. (1982). Development of a simple cross-flow water turbine for rural use (p. 35). Autralia.
Desai, V. R., & Aziz, N. M. (1994). An Experimental Investigation of Cross-Flow Turbine Efficiency. *Journal of Fluids Engineering*, *116*(3), 545. http://doi.org/10.1115/1.2910311
Dragomirescu, A. (2016). Numerical Investigation of the Flow in a Modified Bánki Turbine with Nozzle Foreseen with Guide Vanes, (Epe).
Endashaw Tesfaye Woldemariam , Hirpa G. Lemu, and G. G. W. (2018). CFD-Driven Valve Shape Optimization for Performance Improvement of a Micro Cross-Flow Turbine. *Energies*. http://doi.org/10.3390/en11010248
Mario Alfonso Arellano Vilchez. (2015). Geometría del álabe del rotor para mejorar el toruqe en una turbina Michell-Banki.
Paish, O. (2002). Small hydro power : technology and current status, *6*, 537–556.
Popescu, D. (2017). Flow control in Banki turbines. In *Energy Procedia* (Vol. 136, pp. 424–429). Elsevier B.V. http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.272
Sammartano, V., Aricò, C., Carravetta, A., Fecarotta, O., & Tucciarelli, T. (2013). Banki-Michell optimal design by computational fluid dynamics testing and hydrodynamic analysis. *Energies*, *6*(5), 2362–2385. http://doi.org/10.3390/en6052362
Summary, E. (2016). World Small Hydropower Development Report 2016 Executive Summary.
V. Sammartano, G.Morreale, M. Sinagra, A. Collura, T. T. (2014). Experimental Study of Cross-Flow Micro-Turbines for Aqueduct Energy Recovery, *89*. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.476
Zanette, J., Imbault, D., & Tourabi, A. (2010). A design methodology for cross flow water turbines. *Renewable Energy*, *35*(5), 997–1009. http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.014

ANEXOS

Parámetros geométricos	Descripción
$\omega_{\max}$	Velocidad máxima de rotación del rotor.
D_{int}	Diámetro interior
D_{ext}	Diámetro exterior
β_1	Angulo de la velocidad relativa respecto a los álabes a la entrada
α_1	Angulo de la velocidad absoluta del fluido a la entrada del rotor
k_u	Coeficiente de velocidad tangencial
β_2	Angulo de la velocidad relativa respecto a los álabes a la salida de la primera etapa
r	Radio de curvatura de los álabes
ϕ	Angulo de curvatura de los álabes
w	Ancho del rotor
Q	Caudal
N_b	Número de álabes
z_a	Número de álabes mojados en la entrada del rotor
v_{in}	Velocidad a la entrada del inyector
θ_s	Angulo de apertura del inyector a la entrada del rotor
H	Cabeza
C_0	Velocidad a la entrada del rotor
h_0	Altura del inyector a la entrada del rotor

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

REVISIÓN DE LA INVESTIGACIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA EN COLOMBIA

REVIEW OF RESEARCH ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES IN COLOMBIA

PhD. Carlos Alberto Romero Piedrahita*, MSc. Edison de Jesús Henao Castañeda**
MSc. Jorge Eduardo Arango Gómez ***

*** Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Tecnología Mecánica.**
Carrera 27 No 10-02 Los Álamos, Pereira, Risaralda, Colombia.
Teléfono (57) (6) 3137300, Fax 3213206.
E-mail: cromero@utp.edu.co.
****Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecánica.**
Carrera 27 No 10-02 Los Álamos, Pereira, Risaralda, Colombia.
Teléfono (57) (6) 3137300, Fax 3213206.
E-mail: edisonhenao@utp.edu.co.
***** Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.**
Carrera 30 No. 45-03, Bogotá, Colombia.
Teléfono (57) (1) 3165000. FAX: (57)(1) 3165000 ext. 13377
E-mail: jearangogo@unal.edu.co

Resumen: En esta revisión se presentan resultados de la exploración de las actividades y temas de investigación relevantes desarrollados en motores de combustión interna por universidades colombianas. El objetivo ha sido determinar qué se ha venido investigando, qué fundamentaciones teóricas, constructivas, tecnológicas, de operación y de manufactura se han asumido por parte de los grupos de investigación e investigadores y, a partir de allí, proponer líneas de investigación que complementen y aporten. Se encuentra que Colombia tiene capacidad científica competitiva en: caracterización de combustibles alternativos, diagnóstico y predicción de la combustión en motores de encendido provocado, modelado y predicción de desempeño de motores alimentados con mezclas de etanol-gasolina, caracterización de emisiones, modelado y experimentación en modos de encendido por compresión de carga homogénea, diseño y construcción de equipos para monitoreo y diagnóstico con técnicas no intrusivas. En general, las investigaciones han sido impulsadas tanto por demandas ambientales del sistema de transporte como por la búsqueda de fuentes combustibles alternativas.

Palabras clave: Estado del arte, motores de combustión, líneas de investigación.

Abstract: In this review we present the results of the exploration of relevant research activities and topics developed in internal combustion engines by Colombian universities. The objective has been to determine what has been investigated, what theoretical, constructive, technological, operational and manufacturing foundations have been assumed by the research groups and researchers and, from there, to propose research lines that complement and contribute. It is found that Colombia has competitive scientific capacity in: characterization of alternative fuels, diagnosis and prediction of combustion in ignition engines, modeling and performance prediction of engines fueled with ethanol-gasoline blends, characterization of emissions, modeling and experimentation in modes of ignition by compression of homogeneous charge, design and construction of equipment for monitoring and diagnosis with non-intrusive techniques. In general, research has been driven both by environmental restrictions of the transport system and by the search for

alternative fuel sources.

Keywords: State of the art, combustion engines, research lines.

1. INTRODUCCIÓN

Los programas de Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, proyectando sus actividades de docencia e investigación en Diseño, Manufactura y Térmicas y vista la importancia para el país del sector automotor, ha propuesto un programa de Ingeniería de Manufactura y una línea de investigación en energías alternativas. Del mismo modo, viendo como en el país es recomendada la operación de motores con combustibles alternativos (etanol, gas natural, biodiéseles, etc.), pero no son promovidas acciones constructivas y tecnológicas tendientes a la optimización del desempeño (rendimiento y potencia de los motores) con estos combustibles, la UTP ha incursionado en la exploración de la actualidad y relevancia para el país de temas relacionados con la investigación en diseño y manufactura de partes para motores y en diseño y manufactura de sistemas de variación de la relación de compresión en motores de combustión interna (MCI).

Una revisión de los trabajos realizados en MCI en el país es necesaria para la definición y estructuración de líneas de investigación. El trabajo en líneas permite conocer, referenciar y guardar la trayectoria, tradición investigativa y el saber en los fenómenos, las actividades experimentales, los equipos, lo mismo que el inventario de técnicas asimiladas y desarrolladas en la práctica investigativa. Aunque pueden proponerse autónomamente temas y líneas de investigación en MCI, es razonable averiguar cuál es el estado del arte de las investigaciones relacionadas en Colombia para justificar el abordaje de temas de investigación complementarios a los existentes o nuevos para el país, de manera que se considere la generación de construcciones originales teóricas, numéricas y experimentales en nuestro medio. Explorando la página de Colciencias, hasta el mes de diciembre de 2017, son muchos los grupos de investigación relacionados con la energía o los combustibles, que formulan entre sus objetivos la investigación en MCI. La mayoría de estos grupos parten del MCI como una máquina ya diseñada y disponible, objeto de caracterización en su desempeño, sin abordar el diseño directo y la manufactura de los motores, más allá de los trabajos relacionados con modelado CAE estructural, fluidodinámico o cinético-químico.

De los grupos encontrados, los que más se destacan por los trabajos relacionados en las hojas GrupLac y CvLac de los investigadores, son los de las universidades de Antioquia (UniAntioquia), Nacional (Unal), Universidad Industrial de Santander (UIS), Andes (UniAndes), del Norte (UniNorte), Bolivariana (UPB) y Tecnológica de Pereira (UTP).

En los siguientes apartes de este trabajo es presentada la metodología seguida para realizar la exploración del estado del arte de las investigaciones en MCI en Colombia. Seguidamente es presentado el contexto de la investigación relacionada con estas máquinas, partiendo de una condensada visión de los autores sobre el estado de desarrollo de los motores y los tipos de investigaciones realizadas en el campo en general en el mundo. Finalmente son presentadas las conclusiones y consideraciones que responden a los objetivos perseguidos con esta revisión.

2. METODOLOGÍA

Metodológicamente, la exploración realizada es de tipo documental, complementada con visiones de campo de los laboratorios de algunas de las universidades, y conversaciones personales. Se ha levantado un estado del arte, a partir del conocimiento en el tema de los autores, siguiendo las páginas de Colciencias, leyendo las páginas de los grupos de investigación relacionados (GrupLaC) y las hojas de vida (CvLaC) de los investigadores o coordinadores de las líneas de investigación, siguiendo los trabajos de grado dirigidos, los títulos de las publicaciones en revistas, los proyectos realizados y la mirada a

algunas de las publicaciones representativas encontradas en la red.

Las preguntas que dirigen la investigación relacionada son: ¿Por qué es importante investigar en MCI? ¿Se tienen líneas de investigación o proyectos en las universidades del país dirigidas al estudio de la manufactura de los MCI? ¿Existen trabajos de investigación en motores que se relacionen con la variación de la relación de compresión en motores? ¿Cuál ha sido el aporte de las universidades del país a la investigación en MCI? ¿En qué temas, fenómenos o actividades relacionadas con los MCI han centrado las universidades sus trabajos de investigación? ¿Qué hace que esos temas sean los investigados? y por último ¿Hacia dónde se dirige en las universidades la investigación en MCI? De esta manera, la intención que guía la presente exploración del estado del arte consiste en determinar si tiene efecto diferenciador y complementario para la investigación en motores en el país, la investigación en fabricación de partes y sobre alternativas constructivas de variación de la relación de compresión en los MCI reciprocantes.

El objetivo general de la investigación está relacionado con las preguntas antes mencionadas: fundamentar la pertinencia de una investigación en diseño, modelado y fabricación de partes para MCI alternativos, empleando los fundamentos teóricos de mecanismos y procesos de manufactura y con consideración de las necesidades de variación de la relación de compresión para mejorar en los motores la operación con combustibles múltiples.

La investigación bibliográfica es centrada en los MCI, pero tiene en cuenta lo investigado en los marcos teórico, constructivo, tecnológico, numérico, operacional y de manufactura. Por teórico es entendido lo relacionado con la fenomenología y los modelos de los procesos; por constructivo lo relacionado con el diseño y el control de los mecanismos y los sistemas; por tecnológicos, en el contexto de este trabajo, los procesos de manufactura y los materiales empleados para la manufactura de las partes de los mecanismos y los sistemas; por numérico, la realización en código de los modelos físicos que describen los fenómenos, el comportamiento o la operación de los mecanismos y los sistemas para su creación y evaluación virtual; por operacional, los conceptos relacionados con la utilización, el servicio, el ajuste, las adaptaciones, modificaciones y reparación de los mecanismos y los sistemas; por manufactura, la fabricación de partes, mecanismos y sistemas.

3. LA INVESTIGACIÓN EN MCI EN COLOMBIA.

En esta sección son presentadas globalmente las investigaciones relacionadas con los MCI en el país, son relacionados los grupos de investigación e investigadores de la UniNorte de Barranquilla, de la Unal de Colombia, de la UniAndes, de la UIS, la UniAntioquia y la UTP, por el volumen de sus trabajos publicados, sin desconocer que existen trabajos experimentales y exploratorios en otras instituciones, pero que no presentan una continuidad de investigación en los temas de MCI.

La finalidad de esta exploración sobre MCI es caracterizar los proyectos, las líneas de investigación, las tendencias temáticas, los problemas técnicos, científicos, tecnológicos, numéricos, energéticos y ambientales que son abordados por parte de los investigadores en Colombia. Para ello se accedió a la plataforma SCienTI de Colciencias (Gruplac) y se hizo un recorrido por los trabajos realizados en las áreas relacionadas con los MCI y los combustibles.

3.1 UniNorte (Grupo UREMA). Encabezado por el profesor Lesme Corredor, tiene entre sus líneas de investigación el estudio de combustibles alternativos: obtención y caracterización de biomasa y biocombustibles; caracterización y utilización energética de gases obtenidos por gasificación de cascarilla de arroz y otros subproductos vegetales, así como del biogás obtenido en granjas de ganado; caracterización y utilización energética de aceites (derivados de jatrofa, palma, higuerilla); de alcoholes (derivados de yuca y caña de azúcar) y de gas natural (Corredor et al., 2000; Corredor, 2002, Corredor et al., 2003; Retamoro y Rojas, 2004). Además el grupo ha realizado adaptaciones y diseños particulares de sistemas de alimentación, encendido y control en motores vehiculares y grupos electrógenos para realizar en ellos evaluaciones experimentales energéticas, de

emisiones, de recuperación de calor, de cogeneración y exergéticas, con la variedad de combustibles alternativos explorados; han evaluado los efectos de fumigación de n-butanol y alcohol anhidro en los motores Diesel, como también el desempeño de motores con mezclas de combustibles alternativos ACPM-biodiesel, Diesel-gas, gasolina-etanol (López, 2010; Duarte y Corredor, 2011; Ramírez, 2012; Corredor, 2015). Con respecto a estudios de explotación del motor, han efectuado análisis comparativo de motores convencionales y convertidos a gas en vehículos funcionando a grandes alturas, han adquirido capacidad en estudios exergo-económicos en vehículos de transporte y han hecho estudios de viabilidad técnica y económica para la remanufactura local de motores encendidos por chispa alimentados con combustible gaseosos (Corredor, 2006). En técnicas de diagnóstico y monitoreo, han diseñado y construido sistemas de adquisición, procesamiento y visualización de las señales en motores; han investigado sobre sistemas electrónicos para administración energética en flotas vehiculares. En propuestas de diseño, han manufacturado rediseños de mezcladores aire-gas para motores de encendido por chispa (Corredor, 2004, 2005; Corredor et al, 2002; Pino, 2005; Centeno 2003; Lafaurie, 2000; De los Ríos, 2001). En el campo teórico, realizan simulaciones mediante CFD del proceso de mezclado aire-gas natural en un motor Diesel turboalimentado (Corredor y Bermejo, 2010) y han logrado desarrollar un software para la predicción de golpeteo en motores de encendido provocado (Knocking Predictor).

3.2 Unal de Colombia (Grupo de Investigación en biocombustibles, energía y protección del medio ambiente y Grupo de Investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética). La Unal es líder a nivel nacional en la realización de estudios para el sector automotor, pruebas de automotores y MCI. Entre las líneas de investigación se cuentan: simulación y pruebas de MCI, producción de biogás con digestores anaeróbicos, aclimatación de motores, gestión energética con motores Diesel, desarrollo y adecuación de equipos para pruebas de inyección electrónica de gasolina, estudio exploratorio de metales pesados en material particulado de emisiones de exosto de motores Diesel.

El grupo de trabajo del profesor Mantilla ha hecho una extensa revisión en la literatura, de las propiedades físico-químicas de mezclas gasolina-etanol (número de octano, calor de vaporización, presión de vapor Reid (RVP), temperatura de autoencendido, densidad, poder calorífico inferior (LHV), solubilidad en agua), las emisiones (CO), hidrocarburos totales sin quemar (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), aldehídos (formaldehído y acetaldehído), etanol sin quemar, y los parámetros de operación del motor (consumo de combustible, potencia), en función de la variación del contenido porcentual de etanol (Mantilla, 2011, 2015a, 2015b). En el campo teórico estudia los procesos de combustión de mezclas gasolina-etanol en MCI, conduce estudios teórico-experimentales de la velocidad de llama laminar y longitud de Markstein para diferentes mezclas de H_2/CO/CH_4/CO_2 en diferentes mecanismos de cinética química, para el gas de síntesis (Syngas) producido a partir de gasificación de biomasa (Díaz, 2014), ha modelado la generación de material particulado en función de la composición de azufre en el combustible (Rodríguez, 2007), ha modelado el efecto de la viscosidad en la combustión de la mezcla B20 de biodiesel de palma en motores encendidos por compresión (Ortiz, 2007), ha modelado la presión, temperatura y tasa de reacción en la combustión de motores MCI-EC basado en el método de clausura k-ε para la turbulencia (Mora y Díaz, 2013), ha utilizado el programa computacional KIVA (código internacional de modelado de dinámica computacional CFD) como una herramienta para predicción del comportamiento de la combustión en MCI simulando los chorros de combustible en la cámara en ambiente reactivo (Forigua, 2011).

Sobresalen los trabajos de modelado y simulación realizados con herramientas de alto nivel como es el caso del "Desarrollo software de un módulo de cinética química en fase gaseosa para simulación 3D de MCI", resultado del trabajo de Maestría de Carlos Felipe Forigua (Forigua, 2013).

El grupo de investigación del profesor Mantilla accede al código fuente de los programas KIVA-4 y Cantera y en sus objetivos contemplan modificar KIVA-4 para que admita mecanismos cinéticos en fase gaseosa de un número de especies arbitrario. En esta dirección, dentro del grupo de investigación de la Unal, se realizan trabajos de

modelado y simulación de modos de combustión homogénea por compresión y premezclada, HCCI y PCCI, en MCI, que son investigaciones de vigencia y actualidad en el contexto internacional. Adicionalmente, en el grupo actualmente se desarrolla un módulo de software de cinética química en fase gaseosa para simulación 3D de MCI utilizando mecanismos cinéticos semidetallados (Olave, 2013).

El grupo ha estudiado la viabilidad ambiental en Colombia del uso de biocombustibles en motores de encendido provocado y por compresión (Montenegro et al, 2015; Mantilla et al, 2008), ha trabajado en la producción de biogás a partir de pollinaza en biodigestores (Henriquez y Niño, 2005); ha estudiado el desempeño de motores a carburador y con inyección alimentados con combustible E10 en la ciudad de Bogotá, así como el funcionamiento de MCI de encendido provocado utilizando biogás (Forero et al, 2012; Forero y Sierra, 2014; Sierra et al, 2015). En otros trabajos, ha valorado el consumo de combustible y el índice de opacidad en motores con sistema de alimentación dual Diesel-gas natural (León, 2007) y los efectos de adicionar etanol y jatrofa en motores Diesel (Mantilla y Acevedo, 2008).

En el plano experimental, en la Unal han abordado proyectos de diseño, construcción y pruebas de partes de motores y sus sistemas: sistema de inyección de combustible controlado electrónicamente (Chávez, 2012), catalizador enzimático para un motor Diesel, optimización y diseño de sistema de entrada de aire en motores de dos tiempos. Se destaca como proyecto de ingeniería, el prediseño y simulación de un sistema de inyección directa para un MCI de dos tiempos, basado en un código desarrollado en Matlab (Mantilla et al, 2007). En manufactura, el grupo ha participado en la construcción de una máquina centrifugadora para fabricar cilindros de fundición gris ASTM 40 (Mantilla 2009).

Es importante el trabajo de Oscar Edwin Piamba sobre pruebas de desempeño y emisiones de mezclas de alcohol anhidro en MCI carburados con presión ambiental simulada (Piamba y Arias, 2007); sobre la identificación y cuantificación de los mecanismos corrosivos del biodiesel de palma y diésel fósil en sustratos de fundición de hierro gris, por su relación de aplicación en motores Diesel, en los cuales la camisa del cilindro, el mono bloque y el pistón son fabricados en general de fundiciones de hierro gris (Castro, 2013; Piamba, 2014; Amaya, 2013). En diagnóstico, son importantes los trabajos de medición de emisiones e indicadores de desempeño de mezclas Diesel-biodiesel y Diesel-triglicérido y los de aplicación de técnicas ópticas para la estimación de contaminantes en gases de escape de MCI (Melo, 2013; Piamba, 2013).

El profesor Helmer Acevedo, aparte de sus trabajos en biomasas como alternativas energéticas industriales y rurales, ha realizado estudios experimentales y de diagnóstico de operación: estudio de diferentes biomasas como alternativas de biocombustibles para MCI; impacto funcional y de durabilidad de las mezclas E10 en la operación de los motores de encendido provocado en la ciudad de Bogotá (Mantilla y Acevedo, 2008; Acevedo et al, 2012); estudios de desempeño ambiental y mecánico de mezclas hechas de aceite de palma, etanol y Diesel (Mantilla y Acevedo, 2006); combustión de biodiesel de palma en altas altitudes; comparación de emisiones de motores operados con petrodiésel y biodiesel; evaluación funcional en banco de un motor y sus sistemas asociados durante mil horas operando con una mezcla de gasolina alcohol carburante al 10% (E10); evaluación de dispositivo de alimentación dual en MCI encendidos por compresión, prueba en laboratorio y en ruta comercial; evaluación de sistema de alimentación dual diésel-gas natural en un MCI encendido por compresión de 2200 hp (León, 2007); evaluación del dispositivo para alimentación dual en MCI encendidos por compresión (Mantilla et al, 2008); investigación tecnológica del uso de aceite de jatrofa curcas como combustible alternativo para uso en motores encendidos por compresión en Carbones del Cerrejón.

En el mismo grupo de investigación de la Unal, el profesor Jorge Arango ha liderado la línea de investigación de aclimatación de motores, desarrollo y adecuación de equipos para pruebas de inyección electrónica de gasolina en laboratorio. En esta línea se desarrolló un banco de pruebas de inyectores Diesel con control electrónico para las Fuerzas Militares de Colombia; se realizó el diseño

y construcción de un medidor de gasto másico de aire. El grupo ha diseñado un banco de medición y control de pruebas de motores; ha actualizado la instrumentación de un freno Froude de 150 hp, para el registro automatizado de pruebas en MCI.

El grupo del profesor Arango ha trabajado en el desarrollo y adecuación de equipos para pruebas de inyección electrónica y emisiones en motores, particularmente utilizando bio-combustibles. Diseñó un software para una unidad de control electrónico para inyección de gas natural en MCI; ha conducido estudios exploratorios de metales pesados en material particulado de emisiones de escape de motores a Diesel (Mantilla et al, 2009). En el grupo MDLyGE ha desarrollado un programa para el diseño de radiadores líquido-gas; y ha realizado estudios de evaluación de comportamiento energético de moto-generadores operando con gas licuado de petróleo (GLP) de alto butano (Sierra et al, 2014). Actualmente, desarrollan herramientas para simulación y análisis de ciclos termodinámicos y de equipos que operan con vapor. Además de acreditar la producción de software para simulación de ciclos termodinámicos en MCI, el profesor Arango desarrolló como prototipo industrial, un medidor de gasto másico de aire basado en termistores.

En la misma Unal el profesor Fabio Sierra ha trabajado simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en reactores de lecho fijo, en evaluación del efecto de la temperatura en la producción de biodiesel con aceite de higuerilla, evaluación de los residuos del cacao y madera para su uso como materia prima de procesos de gasificación, y producción de biodiesel a partir de aceites usados de fritura. Relacionado con motores, ha investigado sobre el comportamiento de las emisiones de motores operando con biodiesel de grasa de pollo y de higuerilla en motores de encendido por compresión y con biogás en motores de encendido provocado (Silva, 2014; Pérez, 2014).

Un proyecto muy pertinente que está llevando a cabo actualmente el grupo MDLyGE, es “Validar y realizar la precomercialización de plantas de cogeneración de energía eléctrica y térmica con tecnología de combustión y generador eléctrico conectado a un motor de vapor” (Sierra, 2014). El profesor Sierra participa activamente en la Red PRIDERAS, un sistema de cooperación interinstitucional para la promoción de mercados energéticos, programas de investigación y formulación de estrategias, programas y proyectos que permitan el desarrollo de la industria energética en zonas rurales (Sierra et al, 2015).

LabFabEx es un laboratorio de manufactura moderno diseñado y construido por el profesor Córdoba director del Grupo en Nuevas Tecnologías de Diseño y Manufactura-Automatización de la Unal de Bogotá y que actualmente trabaja en el desarrollo de una mini-fábrica celular robotizada experimental con el paradigma de la nueva industria 4.0 (Córdoba, 2015). Es un laboratorio que podría integrarse en sus aplicaciones con los laboratorios de MCI en las proyecciones de fabricación de partes para motores de combustión.

3.3 Universidad de Los Andes. En la UniAndes diferentes investigadores a lo largo de estos últimos años han trabajado en metodologías para la evaluación mecánica, energética y ambiental de modificaciones hechas a vehículos automotores; han desarrollado metodologías para determinación de ciclos de conducción (Bermúdez, 2011; Gómez, 2010) y para evaluación de desempeño de motores en alturas (García, 2012). A nivel experimental, han participado en la instalación y modernización de un dinamómetro de chasis para la evaluación del desempeño de automotores y en la optimización de un sistema de medición para el consumo de combustible de automóviles por medio de electroválvulas (Heidermann, 2010). En su momento, el profesor Huertas participó en el desarrollo de equipos de laboratorio y lideró estudios de generación de energía eléctrica a partir de biogás, diseño y construcción de filtros de partículas de las emisiones de los vehículos Diesel (Trujillo, 2001). Las capacidades del laboratorio de Materiales de la UniAndes han sido utilizadas para la caracterización de materiales (Ramírez, 2011).

3.4 Universidad Industrial de Santander. Grupo GIEMA. El grupo GIEMA (Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente), en el cual participa el profesor Jorge Chacón, ha abordado el estudio de los MCI en las aplicaciones de generación de energía y para automotores, explorando la utilización de los combustibles

alternativos de origen vegetal (Chácon et al, 2007), los alcoholes, el biogás de diferentes fuentes y el etanol, y formando a los estudiantes, en el modelado de los ciclos y el diseño de los motores. Ha desarrollado programas de computación como herramientas didácticas: Software para la simulación de los ciclos termodinámicos de los MCI de cuatro tiempos SICICLOTER 1.0 (Chacón et al, 2002); diseño de piezas móviles de MCI para la asignatura Máquinas Térmicas Alternativas (DIMOT); Herramienta educativa en la web basada en la simulación de los procesos termo fluido-dinámicos de MCI, SIMTA 1.0.; Software para la simulación del comportamiento de motores Diesel trabajando con mezcla Diesel-gas natural, SIMDUAL 1.0; Desarrollo e implementación de interfaz gráfica de usuario y su integración en el paquete motor de inferencia difuso del prototipo SEXPD.

El grupo GIEMA es reconocido en la adecuación de salas de pruebas con dinamómetro hidráulico de Froude y bancos basados en plantas de generación (motor-generador). Era reconocido el montaje motor Renault-dinamómetro hidráulico en sala aislada y térmicamente controlada e instrumentada para la adquisición y el registro de las medidas del motor, incluyendo la construcción de las características de velocidad, carga, regulación y emisiones. Ha tenido como elemento diferenciador el estudio de metodologías para el diagnóstico de motores basadas en técnicas no intrusivas como el análisis de las fluctuaciones de la velocidad angular del cigüeñal y el análisis de oscilaciones del bloque del motor (Chacón, 2002); Chacón, 2003).

En la de mantenimiento, se han desarrollado proyectos como: el diseño, desarrollo e implementación de un software para determinar el índice de mantenibilidad en motores Diesel; sistema de información para el control de mantenimiento de los sistemas con MCI de la planta física de la UIS; diagnóstico de fallos mediante la utilización de información incompleta e incierta; diseño y montaje de un sistema para la medición de la relación aire/combustible en el banco de pruebas del LMTA. Actualmente está construyéndose el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el área de MCI y para él se han realizado todos los estudios de adecuación de las salas de ensayos.

En el campo teórico han trabajado en: modelado y simulación del flujo en el sistema de escape en MCI Diesel 4 tiempos; estudio teórico experimental sobre el incremento en la eficiencia del ciclo de combustión por efecto de la disminución de transferencia de calor neta por ciclo en la combustión de baja temperatura utilizando un modelo cero dimensional. En el campo del diseño y manufactura, se ha realizado el proyecto de reingeniería y construcción del cilindro de un motor de dos tiempos monocilíndrico de pequeña cilindrada; el diseño y construcción de un módulo sensor-transmisor para medir las emisiones en motores Diesel sin carga. El grupo desarrolló un destilador móvil para la extracción de aceites esenciales por los métodos de hidro-destilación y agua-vapor.

3.5 Grupos de investigación de la Universidad de Antioquia relacionados con los motores de combustión. En la UdeA, los grupos GASURE, QUIREMA y GIMEL lideran investigaciones en el estudio de los combustibles, el uso eficiente de la energía y el estudio de los MCI, entre otros campos relacionados.

En el país, los grupos GASURE, y GIMEL son grupos líderes en investigaciones en combustibles y en operación, predicción y diagnóstico de MCI. En estos grupos, investigadores como Andrés Amell, John Ramiro Agudelo, Iván Darío Bedoya, entre los principales, han hecho importantes contribuciones investigativas no solo en la caracterización integral multivariable de todos los combustibles de la canasta energética colombiana y la valoración del desempeño de los motores alternativos encendidos por compresión y por chispa para grupos electrógenos y para automoción, sino que han aportado con el desarrollo de software nacional para la predicción y el diagnóstico de la combustión y de los procesos fluidodinámicos en los sistemas de admisión, escape e inyección y han ahondado en el estudio fenomenológico de los procesos de los motores con profundidad académica aplicada e insertándose de manera ejemplar en la dinámica de la cooperación científica e investigativa internacional. Desde el año 2000 el grupo GIMEL ha tenido un gran crecimiento, no solo en la producción, sino también en la incorporación significativa de investigadores

y en la formación de estudiantes a nivel de maestría y doctorado, convirtiéndose en el grupo más importante en MCI en el país. El grupo ha ampliado su capacidad investigativa en la medida en que se ha comprometido con la ejecución de proyectos demandados por el sector energético y del transporte y ha logrado adecuar salas suficientemente instrumentadas y actualizadas para ensayos de motores. Dispone aparte del ICP, del único motor CFR de compresión variable normalizado en el país y de dos dinamómetros completamente instrumentados.

El profesor Amell, fundador del grupo GASURE, ha seguido de cerca los programas de investigación e innovación en combustión y sistemas energéticos en los sectores del transporte, industrial y residencial. Según él, en Colombia "No se ha desarrollado una industria nacional fuerte de fabricación de equipos de combustión y calentamiento que incorporen las tendencias tecnológicas en nuevos tipos de combustión. Además, tampoco se ha desarrollado una infraestructura experimental para la certificación y normalización de equipos y procesos" (Amell, 2014).

También, dentro de las líneas sugeridas de investigación en combustión y combustibles para Colombia, el profesor Amell sugiere: "Evaluación y adaptación al piso térmico colombiano de nuevas tecnologías de MCI para aplicar en el sector transporte, generación distribuida y energización rural. El sector transporte es el mayor consumidor de energía térmica en Colombia con el 36,5 % de la demanda y en consecuencia estratégico, para lograr impactos significativos en eficiencia energética, por lo que en cinco año deberán estar funcionando cinco proyectos pilotos con tecnología de MCI de nueva generación adaptadas a las condiciones atmosféricas del piso térmico colombiano, esto es: motores duales con EGR para aplicación en grandes altitudes, motores fuel flex, motores HCCI, motores a gas operando con mezclas 85% gas natural y 15% hidrógeno, motores con biodiesel al 100% y con corrección del efecto de altitud, motores a gas funcionando con gas natural licuado."

Son conocidos a nivel nacional e internacional los trabajos de John Ramiro Agudelo en fundamentos termo-fluido-dinámicos de los MCI, en diagnóstico y predicción de la combustión, en estudios de caracterización de combustibles y su influencia en el desempeño, el consumo y las emisiones de los motores operando con combustibles convencionales y alternativos, y en caracterización del material particulado producido por los motores Diesel, entre otros estudios. El profesor Agudelo diseñó el primer software para el diagnóstico de la combustión en Colombia y con él se tienen los principales proyectos en cooperación académica en MCI con grupos de investigación internacionales, dentro de los cuales el de la Universidad de Castilla La Mancha Ciudad Real ha sido el principal aliado y co-investigador.

El grupo de investigación GIMEL ha realizado proyectos de combustibles: estudio de las propiedades de mezclas de biodiesel en condiciones normales y a bajas temperaturas (Agudelo et al, 2007); estudio teórico-experimentales de procesos de gasificación de biomasa (Agudelo et al, 2010); evaluación experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel (Agudelo et al, 2003); análisis de calidad de los biogasóleos de aceite de palma e higuerilla (Agudelo et al, 2011); fraccionamiento por cristalización del biodiesel de aceite de palma como alternativa para mejorar sus propiedades de flujo a baja temperatura (Agudelo et al, 2008); estudio de las variaciones en la composición química del combustible y la morfología del hollín inducidas por el grado de saturación del biodiesel y las mezclas de biodiesel (Agudelo et al, 2012); valoración de propiedades clave y estrategias de mezclado de aceites vegetales hidro-tratados para ser usados como combustibles en motores Diesel; escenarios de mezclado de los biocombustibles de aceite de soya con combustible Diesel convencional (Agudelo et al, 2003); impacto de los aceites vegetales crudos en la reactividad oxidativa y la nanoestructura del material particulado en los Diesel (Agudelo et al, 2014); lubricidad de las mezclas de etanol-biodiesel-Diesel (Agudelo et al, 2010); módulo de compresibilidad de mezclas Diesel-biodiesel (Agudelo et al, 2012); efecto del grado de insaturación de los combustibles biodiesel en el desempeño de los motores, las características de combustión y las emisiones (Agudelo y Benjumea,

2007); efecto del combustible en la nanoestructura del hollín y las consecuencias sobre la carga y regeneración de los filtros particulados Diesel (Agudelo et al, 2012).
El espectro de investigaciones de desempeño de motores en función de los combustibles es amplio e incluye: estudios de desempeño dinámico, energético y ambiental de vehículos operando con diferentes combustibles en motores de encendido provocado y de encendido por compresión, con consideración de la altura (Agudelo et al, 2006; Agudelo et al, 2006); análisis predictivos y de diagnóstico bajo primera y segunda ley en motores operando con diferentes tipos de biodiesel y sus mezclas (Agudelo et al, 2006), con gas natural (Agudelo et al, 2010), con emulsiones agua/Diesel (Agudelo et al, 2015), en modo bi-combustible gasolina-gas natural (Agudelo et al, 2000), modo bicombustible Diesel-gas natural; impacto de la fumigación de combustibles (n-butanol y etanol hidratado, entre otros) en el desempeño y las emisiones contaminantes de los motores (Agudelo et al, 2015); impacto de la presión en el rail y la alimentación de biodiesel en la morfología del material particulado y en la nanoestructura en motores Diesel turbo cargados de inyección directa (Agudelo et al, 2012; Agudelo et al, 2017).

En la línea de análisis teórico-experimental, el grupo ha realizado trabajos de investigación en: motores de encendido por compresión turboalimentados en régimen transitorio (Agudelo, 1998); modelado de la renovación de la carga (Agudelo et al, 2003); análisis mecánico y termodinámico en motores de encendido provocado adaptados a funcionamiento bi-combustible gas natural-gasolina (Agudelo et al, 2000); estudios experimentales de combustión de combustibles alternativos renovables en un motor CFR-ASTM (Velásquez, 2006; Agudelo, 2014); desarrollo de un modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural para motores (Agudelo y Mejía, 2002); efecto de la ecuación de estado en el diagnóstico termodinámico de la combustión Diesel (Agudelo et al, 2006).

En la línea de estudios numéricos, el grupo ha realizado trabajos de investigación en: aplicación de un modelo de acción de ondas al estudio de la renovación de la carga en motores de cuatro tiempos; modelado de flujo compresible unidimensional y homo-entrópico por el método de volúmenes finitos (Agudelo et al, 2008); desarrollo de una ecuación para la estimación de los coeficientes de difusión alcohol-aire requerida para el modelado de las pérdidas evaporativas en sistemas de alimentación de combustible (Agudelo et al, 2014; Agudelo et al, 2016); aplicaciones de la mecánica de fluidos computacional (modelado con OpenFoam) al estudio de: regeneradores térmicos, de chorros Diesel (Agudelo y Gutiérrez, 2008; Agudelo et al, 2009).

En la línea de técnicas experimentales, el grupo ha realizado trabajos de investigación en: optimización de los parámetros de espectroscopia Raman para la caracterización del hollín de diferentes combustibles (Agudelo et al, 2011); instrumentación de un vehículo para realizar pruebas en ruta (Giraldo, 2008); diseño e implementación de una unidad de control electrónica para un motor de encendido provocado (López, 2007; Agudelo et al, 2014); automatización y control de un banco de ensayos de MCI alternativos (López, 2009; Agudelo et al, 2006); desarrollo de herramientas informáticas para el diagnóstico de la combustión en motores; desarrollo de un sistema de inyección electrónica para el sistema de inyección dual de un motor Diesel; desarrollo de un kit electrónico para fumigación multipunto de bioetanol hidratado y biobutanol en motores Diesel.

En la línea de valoración del aprovechamiento energético de los combustibles y de la recuperación de energía en los MCI, en la UdeA ha habido una preocupación permanente por parte de los grupos GASURE, QUIREMA y GIMEL, lo que los ha convertido en consultores importantes a nivel nacional. Muestra de esto son las investigaciones sobre análisis energéticos (Agudelo et al, 2002) y exergéticos (Agudelo et al, 2009) y de recuperación de energía (Agudelo et al, 2016), realizadas con rigor teórico y experimental.

En la UdeA se ha elaborado software original para el estudio de los MCI: INDICOM, DIAGCOM, TRANSIENT, ARAMÉ, CARIBE, DIATERM, DICOMOTOR *on line*, DICOMOTOR *off line*.

Debe anotarse que el volumen de trabajos en MCI realizado por los investigadores del grupo GIMEL

supera en mucho lo resumido en este aparte, que quedan por fuera trabajos importantes que se han realizado en combustibles alternativos, en lo teórico y lo experimental (Agudelo et al, 2007; Agudelo et al, 2008; Agudelo et al, 2009; Agudelo et al, 2010; Agudelo et al, 2015), pero que permiten formarse una idea de las líneas y temas de investigación. También se han realizado trabajos en los temas de control y de evaluación estructural de componentes (Agudelo et al, 2011; Agudelo et al, 2004), aunque no es este aún un perfil de investigación definido. Sin embargo, consideradas las instalaciones de la UdeA y su capacidad de integración con las otras instituciones de la ciudad de Medellín, seguramente alberga el potencial para abordar temas de diseño y manufactura, instrumentación y control de sistemas y partes para MCI, como una iniciativa de apertura hacia la generación de conocimientos y productos constructivos y tecnológicos.

En el grupo GASURE, el profesor Iván Darío Bedoya realizó investigaciones relacionadas con la evaluación de desempeño energético, exergético y ambiental de motores de encendido por compresión alimentados con biodiesel (Saldarriaga y González, 2004; Agudelo et al, 2005; Bedoya et al, 2007), en modo dual Diesel-gas natural (Suárez et al, 2009) y Diesel-GLP (Ruiz, 2009). A un nivel más fundamental, el profesor Bedoya ha venido liderando desde el año 2012 estudios numéricos y experimentales sobre encendido por compresión de cargas homogéneas (HCCI), con el objetivo de utilizar combustibles gaseosos de bajo poder calorífico en plantas generadoras, buscando obtener altas eficiencias y bajas emisiones de NOx (Bedoya, 2012; Bedoya et al, 2012). En sus investigaciones de operación de motores con bajas temperaturas de combustión (LTC), ha tratado de determinar los límites de carga alta y ha ensayado estrategias para ampliar estos límites (Bedoya y Saxena, 2013). Para sus estudios fundamentales y experimentales (Bedoya et al, 2014) ha abordado trabajos de adaptación de mecanismos y sistemas de alimentación de encendido, ha afinado las técnicas de adquisición de datos experimentales en un banco de ensayos (Heredia y Castaño, 2014) y ha innovado en el monitoreo de combustión con sistemas de corriente de ionización (Molina y Restrepo, 2014).

3.6 Universidad Pontificia Bolivariana. En la UPB Seccional Bucaramanga, el profesor Javier Mauricio Castellanos ha coordinado la realización de proyectos de construcción de bancos de pruebas para motores con dinamómetro hidráulico de 65 hp (Ariza y Vanegas, 2012), utilizado en la obtención de curvas de desempeño de un motor (Núñez y Zambrano, 2013). Bajo su dirección se ha desarrollado un modelo para la construcción del diagrama indicado de un MCI (Olarte y Ríos, 2011).

3.7 Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). En la UTP los MCI son objeto de investigación formativa, de diagnóstico y de diseño en los grupos de investigación de Tecnología Mecánica, Diseño y Manufactura y Genergética. Este último ha liderado proyectos nacionales en el estudio del desempeño y la explotación de vehículos alimentados con mezclas de gasolina y etanol hasta E20 (Ríos et al, 2013); proyecta en sus actividades la evaluación del desempeño energético de automóviles en carretera y bajo ciclos de operación en banco de rodillos (Gaviria et al, 2010).

En el campo teórico, el grupo de Diseño y Manufactura de la UTP ha abordado proyectos en: modelado y síntesis de mecanismos de potencia para motores alternativos (Romero, 2007); modelado de las cargas dinámicas de los motores de combustión (Romero, 2003); modelado termodinámico de los MCI alternativos (Romero et al, 2002); modelado de la transferencia de calor en MCI (Romero et al, 2008); balance energético en MCI estacionarios y en vehículos durante el ciclo de conducción (Romero et al, 2014); desarrollo de técnicas de diagnóstico de la combustión basada en el análisis de vibraciones (Quintero et al, 2016); modelado de la gestión térmica de motores de vehículos.

En el campo de la simulación numérica, el grupo ha trabajado en: herramientas para prediseño de mecanismos y sistemas de los MCI (González, 2014); herramientas numéricas para la predicción de dinámica vehicular (Romero et al, 2005); modelado y simulación de MCI con herramientas computacionales comerciales Amesim, Flowmaster, Ansys, GT-Power (Romero y Quintero, 2001).

El grupo de Tecnología Mecánica ha abordado el desarrollo de escenarios didácticos para la enseñanza de los MCI, todos sus sistemas y sus mecanismos (Vélez y Vanegas, 2014); diseño e implementación de sistemas de alimentación de aire y combustible para motores de laboratorio; diseño y construcción de bancos experimentales para ensayos de MCI alternativos y sus sistemas (Quiceno, 2013). En el campo experimental, el grupo de Tecnología Mecánica ha trabajado en: diseño e implementación de protocolos para pruebas de grupos electrógenos en zonas no interconectadas (Romero et al, 2014); diseño, construcción y montaje de sistemas de pruebas de frenado para motocicletas (Romero, 1997); diseño, construcción y montaje de equipos para diagnóstico de sistemas de frenado, alineación y balanceo de automóviles para centro de diagnóstico; desarrollo de alternativas constructivas y tecnológicas para aislamiento de ruido de grupos electrógenos; conversión de motores alimentados por carburador a inyección electrónica multipunto; análisis de información de motores vehiculares durante ciclos de conducción en ciudad (Romero, 2003; Romero et al, 2002; Trujillo, 2013; Flórez, 2014; Osorio, 2012; Muñoz y Torres, 2012).

En el área de Diseño y Manufactura, en la UTP se ha formulado el diseño y la construcción de partes para vehículos y MCI; se han probado componentes individuales como culatas rediseñadas para motores monocilíndrico; se han diseñado, ensamblado y construido bancos de pruebas para motores dotados con diversos dinamómetros de fricción, hidráulicos y eléctricos. El diseño y la fabricación de componentes se proponen en la UTP como una de las líneas importantes de trabajo.

3.8 Aporte de entidades no universitarias. El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) ha realizado investigaciones de caracterización y operación de combustibles en MCI importantes. Son presentados trabajos por Amado et. al (Amado et al, 2008) relacionados con la evaluación del biodiesel de palma en una flota de servicio; Sarmiento (Sarmiento, 2007), relacionado con la utilización de señales acústicas para la caracterización de motores, y Torres (Torres et al, 2002), quien evaluó la influencia en los vehículos con motor de encendido provocado de la adición de 10% al combustible. La fundación CIPAV ha evaluado el uso de biogás obtenido a partir de estiércol de animales porcinos y bovinos en motores de encendido por compresión convertidos a funcionamiento dual para generación de electricidad.

La manufactura endógena de partes para motores en Colombia es escasa, aunque algunas empresas como Reconstructoras o Reparadoras de Motores lograron realizar transformaciones con tecnología adaptada, incluyendo la utilización de tratamientos térmicos. Pero no puede decirse que en Colombia se posea actualmente capacidad para fabricar partes estructurales para motores (bloques, culatas, cigüeñales, árboles de levas). Mahle llegó a tener en Medellín una planta para la fabricación de pistones. Hoy estas empresas han desaparecido. La empresa colombiana Industrias Lavco Ltda, con una participación en el mercado nacional del 25 % en la fabricación de repuestos para automóviles, fabrica pistones en hierro gris y aluminio. Además, produce camisas y pistones para bombas Ingersoll Rand®, Worthington®, Gardner Denver®.

4. COMENTARIOS SOBRE LA REVISIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADA

Hasta el momento la información sobre la investigación en MCI en Colombia es fragmentaria, a pesar de que son reconocidas las personalidades adquiridas por los grupos y los proyectos de investigación, evidenciable en la producción científica y didáctica en las universidades del país. Desde la creación de los programas de Ingeniería Mecánica, a pesar de las limitaciones dadas por las condiciones académicas, de infraestructura y presupuestales, también por las propias del tipo de economía nacional y la nomenclatura de áreas de investigación muy limitada por cada programa de educación nacional y por Colciencias, las investigaciones en motores han ido creciendo, inicialmente en formación didáctico-pedagógica, luego en formación en mecánica de motores y vehículos, luego en estudios de operación de motores comerciales con combustibles coyunturales alternativos y biocombustibles y, en los últimos 15 años en estudios teóricos, científicos y numéricos asociados a la formación de magísteres y doctores en el

campo de los procesos de combustión en MCI, con participación importante en eventos y publicaciones especializadas y con integración a la comunidad académica internacional.

5. CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

El principal propósito de la exploración de los trabajos en MCI ha sido justificar la pertinencia de la investigación en diseño, modelado y fabricación de partes para MCI alternativos. En este sentido, los resultados de la revisión indican que es actual en Colombia la realización de estudios constructivos y tecnológicos en motores de combustión, en sus mecanismos y sistemas y que conduzcan a la fabricación de motores y partes, dado que la manufactura de partes para motor no ha sido sistemáticamente abordada aun por grupo de investigación alguno en Colombia. Así mismo, constituye un espacio de investigación la exploración de medios constructivos y tecnológicos para variar la relación de compresión en los motores, de manera que se puedan potenciar mejor las bondades de los combustibles alternativos y los biocombustibles en las aplicaciones donde las modificaciones de motor estén autorizadas.

Es recomendable que Colombia incursione en el modelado multidimensional de los sistemas de los automóviles. Universidades como la de los Andes, donde cuentan con equipos computacionales de buenas capacidades y prestaciones, podrían intensificar sus aplicaciones de modelado numérico estructural y termo-fluidodinámico en partes, mecanismos y sistemas de MCI. Existen oportunidades para la realización conjunta por grupos de investigación entre universidades, de trabajos de investigación e innovación que apunten a la transferencia tecnológica real y a la innovación en tecnología de motores.

Es la opinión de los autores de esta revisión, que en el país (donde indolentemente se promueve la "chatarrización" de automóviles a pesar de carecer de la tradición de diseño y fabricación) deben darse pasos hacia la investigación constructiva, tecnológica y productiva de partes para mecanismos y sistemas de MCI, ante todo porque se evidencian buenas capacidades en varios grupos de investigación en manufactura, materiales y mecatrónica.

A continuación, presentamos sólo algunas referencias bibliográficas debido a limitaciones de espacio. A quien pueda interesar, los autores se comprometen a enviarles el trabajo en extenso donde se incluyen todas las referencias.

REFERENCIAS

Acevedo, H., Rodríguez, J. F., Tamara, J. D. (2012). Effect of anhydrous and hydrous ethanol on performance and non-regulated emissions of an HCCI engine. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME. v.1 fasc.1.

Agudelo, A. F., Agudelo, J. R., Benjumea, P. (2009). Study of diesel sprays using computational fluid dynamics. Revista Facultad de Ingeniería. V.49 fasc.N/A p.61 – 69.

Álvarez, A. G., Hernández, J. P., López, A. F., Agudelo, J. R. (2017). Average molecular characterization of the soluble organic fraction of mature diesel particulate matter. Combustion and Flame. V.183 fasc.N/A p.299 – 308.

Amado, M., García, J., Carranza, R., Cuéllar, M., Torres, J., Acero, J., Sarmiento, J. A., Sarmiento, J. L., Cabuya, D. Rincón, O. (2008). *Pruebas de larga duración con biodiesel de palma en una flota de servicio público en Bogotá*. Palmas. Vol. 29, N° 4.

Amell, A. (2014). *Elementos para un programa de investigación e innovación en combustión de combustibles fósiles y de origen renovable en Colombia*. Ingeniería y Sociedad No. 8.

Arango, J. E., Sierra, F. E., Silva, V. (2014). *Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás.* Tecnura. V.18 fasc.30 p.152 – 164.

Benavidez, A., Agudelo, J. R., Benjumea, P. (2008). *El fraccionamiento por cristalización del biodiesel de aceite de palma como alternativa para mejorar sus propiedades de flujo a baja temperatura*. Revista Facultad de Ingeniería. V.43 fasc. p.7 – 17.

Cadrazco, M. Agudelo, J. R. y otros. (2017). Genotoxicity of Diesel Particulate Matter

Emitted by Port-Injection of Hydrous Ethanol and n-Butanol. Journal of Energy Resources Technology-Transactions of The ASME. v.139 fasc.n/a p.1 – 5.

Castaño-Mesa, E. S., Quintana, S. H., Bedoya, I. D., Arrieta, A. A. (2016). *Criterios para el procesamiento y evaluación de datos experimentales para un motor de encendido provocado de alta relación de compresión*. Ingeniería y Ciencia 12 (23), 107-125.

Chacón, J. L., Montero, A. I., Rodríguez, E. A. (2002). *Software para la simulación de los ciclos termodinámicos de los motores de combustión interna de cuatro tiempos-SICLOTER 1.0*, Nombre comercial: SICICLOTER 1.0.

Córdoba E. (2015). *Acondicionamiento de un laboratorio fábrica experimental (LabFabEx), basado en la tecnología de e-manufacturing, para el desarrollo integrado de producto y proceso (DIPP).*

Corredor, L. A., Benjumea, P., Agudelo, J. R. (2003). *Biodiesel de aceite de palma: una alternativa para el desarrollo del país y para la autosuficiencia energética nacional.* Revista Facultad de Ingeniería. V.28 fasc. p.50 - 61.

Cuadrado, I. G. Agudelo, J. R. y otros (2008). *Modelado de flujo compresible unidimensional y homoentrópico por el método de volúmenes finitos*. Dyna. V.155 fasc. p.199 – 210.

Diaz, C. A., Gélvez, O., Chacón, J. L., Néstor, A. (2007). *Diseño y construcción de una planta piloto para la producción de biodiesel de manera continua*. UIS Ingenierías. V.7 fasc.1 p.105 – 113.

Forero, C. A., Jochum, J., Sierra, F. E. (2012). Characterization and feasibility of solid biofuels made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards. Environmental Biotechnology. v.8 fasc.2 p.67 – 76.

Gaviria, L., Ospina, S., Quirama, L. (2010). *Estudio del comportamiento de vehículos de carburador e inyección con mezclas etanol gasolina E12-E15*. Universidad Tecnológica de Pereira.

Grajales, J. A., Romero, C. A., Henao, E. J., Lopez, J. F., Torres, D. (2016). Combustion pressure estimation method of a spark ignited combustion engine based on vibration signal processing. Journal of Vibroengineering. V.18 fasc.7.

Guzmán, M. A., Aedila, L. K. Agudelo, J. R. (2015). Combustion Characteristics, Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Water/Diesel Emulsions. Chemical Engineering Transactions. V.45.

Hernández, J.P., Agudelo, J.R., Lapuerta, M., García-Contreras, R. (2016). Modelling of evaporative losses in n-alcohol/diesel fuel blends. Applied Thermal Engineering. v.102 fasc.n/a p.302 – 310.

Jaramillo, J., Zapata, J. Bedoya, I. D. (2017). Interactive control of combustion stability and operating limits in a biogas-fueled spark ignition engine with high compression ratio. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 1-14.

Lapuerta M., Oliva, F., Agudelo, J. R., Boehman, A. (2012). Effect of fuel on the soot nanostructure and consequences on loading and regeneration of diesel particulate filters. Combustion and Flame. V.159 fasc.n/a p.844 – 853.

López, J. D., Espinosa, J. J. Agudelo, J. R. (2011). Decoupled control for internal combustion engines research test beds. Revista Facultad De Ingeniería. v.59.

Mantilla, J. M. (2010). *Análisis comparativo del desempeño y emisiones de un motor diesel de gran capacidad operando bajo dos escenarios: trabajo en ruta activa y trabajo en banco*. Ingeniería e Investigación. V.30 fasc.1 p.118 – 124.

Montenegro, M., Sierra, F. E., Narvaez, F. (2015). Incidence of using chicken fat-based biodiesel on the performance of a 10,5 Kw compression ignition piston engine for power generation. Tecciencia. V.10 fasc.19 p.61 – 72.

Pérez, J. F. Borge, D. Agudelo, J. R. (2010). *Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales*. Revista Facultad De Ingenieria. v.N/A fasc.52 p.95 – 107.

Piamba, O. E. (2013). *Proyecto Red Suramericana para el desarrollo, aplicación y formación*

en técnicas espectroscópicas para monitoreo ambiental. Universidad Nacional de Colombia.

Quintana, S. H., Castaño-Mesa, E. S. Bedoya, I. D. (2017). Experimental study of polytropic coefficient for an air-cooled high compression ratio-spark ignition engine fueled with natural gas, biogas, and propane-syngas blend. Energy and Fuels.

Riaza, H. F., Salvador, Romero, C. A. (2005). *Respuesta transitoria del tren de potencia de un vehículo*. Scientia et Technica. V.28 fasc.N/A p.95 – 99.

Ríos, L. C., Quirama, L. F., Gaviria, L. G. (2013). [*Informe ejecutivo: Determinación del impacto producido por el uso del E20 en el parque automotor colombiano*. Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos y Potencia Mecánica,

Romero, C. A., Olmeda, P., Torregrosa, A. J. (2014). Energy balance during the warm-up of a diesel engine. SAE paper 2014-04-010. SAE 2014 World Congress & Exhibition.

Ruiz, F. A., Cadrazco, M., López, A. F., Sánchez, J., Agudelo, J. R. (2015). Impact of dual-fuel combustion with n-butanol or hydrous ethanol on the oxidation reactivity and nanostructure of diesel particulate matter. Fuel. V.161 fasc. p.18 – 25.

Salamanca, M., Agudelo, J. R., Mondragón, F., Santamaría A. (2012). Chemical characteristics of the soot produced in a high-speed direct injection engine operated with diesel/biodiesel blends. Combustion Science and Technology. V.184.

Salamanca, M., Mondragón, F., Agudelo, J. R., Benjumea, P. (2012). Variations in the chemical composition and morphology of soot induced by the unsaturation degree of biodiesel and a biodiesel blend. Combustion and Flame. V. 159.

Sarmiento, L. O. (2007). *Caracterización del sonido de un motor de combustión interna de automóvil mediante la huella espectral del sonido en el plano tiempo frecuencia*. Iteckne. v.4 fasc.1 p.13 – 17,

Sierra, F. E., Castellanos, J. U., Forero, C. A. (2015). *ngeniería Básica y de Detalle para la nstrumentación de una planta prototipo degasificación de lecho fijo.* Iteckne. V.12.

Torres, J., Molina, D., Pinto, C., Rueda, F, (2002). *Estudio de la mezcla de gasolina con 10% de etanol anhidro. Evaluación de propiedades fisicoquímicas.* Ciencia, Tecnología y Futuro, vol. 2, no. 3.

Villa, L. C. Mejía, R. Agudelo, J. R. (2006). *Diseño de un banco de pruebas para regeneradores térmicos*. Dyna. V.150.

DISEÑO ESTRUCTURAL DE TRANSPORTE PARA SISTEMA DE BOMBEO PORTÁTIL ACTIVADO CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

STRUCTURAL TRANSPORT DESIGN FOR PORTABLE PUMPING SYSTEM ACTIVATED WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY FOR THE DEPARTMENT OF BOYACÁ

Edwin Rúa R.[*], M.Sc. Leonardo Cely[*], Ángela González A.[**], Adriana Granados[**], Rafael Ramírez[***]

[*] Facultad Ingeniería mecánica, Grupo de Investigación: GIDINT.
USTA-Tunja, Boyacá, Colombia. Teléfono (8) 7440404
E-mail:edwin.rua@usantoto.edu.co

Escuela de ciencias básicas tecnología e ingeniería (ECBTI),
Grupos de investigación: [**]GIDESTEC,[***]GIEPRONAL
UNAD-Tunja, Boyacá, Colombia. (8) 7443587
E-mail: angela.gonzalez@unad.edu.co.

Resumen: El sistema de bombeo portátil para riego de cultivos en el departamento de Boyacá, activado por energía solar fotovoltaica, corresponde a una de las posibles soluciones prácticas, con alto potencial de implementación para todo el sector agrícola. El proceso de movilización usualmente se ve afectado por la carencia de redes eléctricas en la zona rural. En Boyacá la mayoría de las unidades productivas requieren el uso de motobombas accionadas por ACPM o gasolina, generando un impacto negativo en el componente económico y en el medio ambiente. Con el diseño estructural de un medio de transporte manual, práctico y liviano para el sistema de bombeo solar fv., se puede aportar de forma significativa a la solución de la problemática. En el diseño de este medio de transporte se aplicó la metodología de diseño de Shigley, para el análisis y optimización del diseño se aplicó una matriz de criterios, durante el proceso de evaluación del diseño se realizaron cálculos de esfuerzo aplicando la teoría de Von Misses. Como resultado final se obtuvo un diseño de medio de transporte manual, práctico, liviano, económico, ergonómico, seguro y confiable. En conclusión se realizó el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico de acuerdo con la potencia requerida por la bomba y con estos datos se realizó el diseño estructural del transporte.

Palabras clave: Bombeo, Construcción, Diseño, metodología Shigley, Riego, Solar fotovoltaica, transporte.

Abstract: The portable pumping system for irrigation of crops in the department of Boyacá, activated by photovoltaic solar energy, corresponds to one of the possible practical solutions with high potential of implementation for the entire agricultural sector, the mobilization process is usually affected by the lack of electricity networks in the rural area.

In Boyacá most of the productive units require the use of motor pumps driven by ACPM or gasoline, generating a negative impact on the economic component and the environment. With the structural design of a manual, practical and light means of transport for the solar pumping system fv., It can contribute significantly to the solution of the problem. In the design of this means of transport Shigley's design methodology was applied, for the analysis and optimization of the design a matrix of criteria was applied, during the design evaluation process stress calculations were carried out applying the Von Misses theory. As a final result, a manual, practical, light, economical, ergonomic, safe and reliable means of transportation was obtained. In conclusion, the sizing of the photovoltaic solar system was carried out according to the power required by the pump, and with this data the structural design of the transport was made.

Keywords: Pumping, Construction, Design, Shigley methodology, Irrigation, Solar photovoltaic, Transportation

1. INTRODUCCIÓN

Colombia al ser un país tropical, presenta riesgos potenciales asociados al cambio climático, especialmente en aspectos relacionados con la disponibilidad hídrica, de tal forma importantes entidades a nivel nacional como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (PNUD, 2011; IDEAM, 2018), han indicado la vulnerabilidad de los ecosistemas ante posibles escenarios de variación climática extrema, haciendo énfasis en los posible cambios sustanciales en la oferta y disponibilidad de agua.

Boyacá, tiene un amplio crecimiento de cultivos agrícolas, la zona geográfica de este Departamento permite el crecimiento y la producción de un elevado número de frutos y vegetales para el consumo humano. El sector agrícola demanda la implementación de técnicas y/o instrumentos que proyecten una mejora y eficiencia en la calidad de sus procesos, por tal motivo, se hace necesario la creación de sistemas autónomos que minimicen las pérdidas a toda la cadena de producción y comercialización de sus productos.

De acuerdo con Pinzón, Cruz & Fischer (2014), en Colombia, se cultiva el duraznero en zonas con temperaturas promedio de 13 a 19°C, entre los 1.800 y 2.800 msnm, regímenes de lluvia monomodales y bimodales y brillo solar promedio de 1.400 horas/año. Para los sistemas de riego por goteo con energía solar indica Mossande, Anaclides Rogério (2015) el riego por goteo se adapta a las pequeñas áreas de terreno y a los sistemas de riego fotovoltaicos (García, 20023; Van Campen et al., 2000). Esta característica es de gran importancia, debido a que en la actualidad crece el interés económico en los sistemas FV.

De acuerdo con el MADR-UPRA, (2018) y el Observatorio ambiental de Boyacá, (2018) en los análisis establecidos a partir del porcentaje de precipitación multimodelo para el periodo de tiempo de 2011-2040, en el departamento de Boyacá se pueden esperar 3 escenarios posibles, en el primero para la región centro sur, centro norte y noroccidental, se pueden presentar reducción en la precipitación que varía entre 10-30%, para la zona suroriental del departamento se esperan oscilaciones entre -10% a +10% de fluctuación en la precipitación en relación a los parámetros actuales y para la zona nororiental se espera un incremento en las precipitaciones entre el 10-30%.

De esta forma municipios comúnmente asociados a la producción de frutales como lo son Sotaquirá y Paipa, pueden presentar reducciones en la precipitación hasta del 30%, situación que afectaría de forma grave el desarrollo de estos cultivos en la región. Por tal razón el objetivo general de este estudio será proponer tecnologías sostenibles que

permitan suplir la demanda hídrica de los cultivos frutales, especialmente mediante el dimensionamiento de un sistema transportable de bombeo accionados por energía solar fotovoltaica que permita reducir las emisiones de CO2 y gases de efecto invernadero a la atmósfera y que permitan hacer un uso eficiente de los recursos disponibles en la región.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elección del cultivo a aplicar se realizó una búsqueda bibliográfica relacionada con los tipos de cultivos de Boyacá (Pinzon, Cruz & Fischer, 2014; Colciencias, 2016; Gobernación de Boyacá, 2018; 2018a; 2018b), se realizaron visitas a los municipios agrícolas aledaños y a través de la observación se pudo seleccionar los árboles frutales como el cultivo más acertado.
Entre los cultivos de árboles frutales se seleccionó el durazno, ya que Boyacá es el mayor productor en Colombia (DANE, 2014; Pinzon, Cruz & Fischer, 2014). De acuerdo con García, Dias Robaina & Calgaro, (2003) y estudios realizados por Miranda y Carranza, (2013) se determinó la cantidad de árboles promedio por hectárea y el caudal por hora.

$$DNC = (ETc \times MP \times \% C) / 100$$

DNC: demanda neta del cultivo
ETc:evapotranspiración cultivo mm/día
MP: Marco de plantación
%C: porcentaje de cubrimiento del follaje

Para el durazno el sistema de riego implementado corresponde a riego por goteo, en el cual la eficiencia es cercana al 90%, de esta forma la demanda real del cultivo (DRC) será:

$$DRC = DNC / 90\%$$

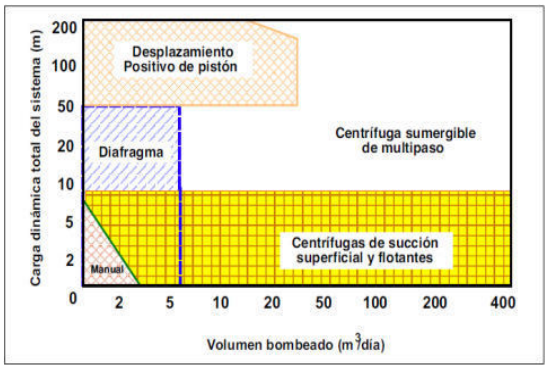
Conociendo la demanda real del cultivo y sabiendo que en promedio existen 278 árboles por hectárea en un arreglo agronómico o marco de plantación en cuadro, se halla el caudal necesario por hectárea. para luego calcular el tiempo de riego por día (TRD).

$$TRD = DRC / ng \times qg$$

Donde:
DRC= demanda real del cultivo
ng= número de goteros (3)
qg= caudal del gotero (4 L.h-1)

Conociendo el tiempo real de riego se puede determinar el número de sectores de riego por día, con el sistema de bombeo seleccionado. Luego se seleccionó la bomba con el caudal requerido por hectárea y la altura de presión promedio para los tipos de cultivos con mayor pendiente o diferencia de altura. Evaluando los intervalos comunes donde se aplican las bombas solares podemos ver que para altura de presión de 20 m y caudal de 17,9 m3/día. la bomba recomendada en la centrífuga sumergible (Fig.1).

Fig. 1: Intervalos comunes donde se aplica los



diferentes tipos de bomba solares. Fuente: www.solar.nmsu.edu

Luego de seleccionar la bomba se dimensiona el sistema solar fotovoltaico, tomando como datos de entrada una bomba solar de 24v DC y 700 w. debido a las condiciones climáticas de Boyacá, se recomienda el panel Monocristalino, ya que este opera mejor bajo la nubosidad o lluvia, ocupa menos espacio y es más eficiente que el policristalino.

Se seleccionan los paneles solares que superen la potencia de la bomba (700wh).

$$Ep = Eb / R$$

Donde:

Ep : Energía necesaria en los paneles
Eb : Energía requerida por la bomba
R : Rendimiento del sistema de Almacenamiento

Paneles = Ep / P (HSP)

Donde:
Ep: Energía a producir por los paneles
P: Potencia del panel
HSP: Horas Sol Pico del sitio

Para la selección del regulador se tiene en cuenta la suma de las corrientes en corto circuito (Isc) de los paneles ya que se configuran en paralelo.

Para darle mayores horas de operación al sistema se seleccionan unas baterías con dos (2) días de autonomía. Para 2 días de autonomía se calcula la capacidad útil de la batería y la capacidad utilizable de acuerdo al voltaje del sistema, luego se determina la capacidad nominal, se recomienda una profundidad de descarga máxima de 50%.

cu=Pot. bomba*N

Cu = cu / 24v

Capacidad nominal = Cu / pd

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para calcular y seleccionar la bomba, se toma como referente los árboles frutales por el espacio existente entre ellos para poder transportar fácilmente el sistema de bombeo sin afectar el cultivo. Específicamente se selecciona el cultivo de durazno para calcular la demanda neta del cultivo (DNC), Pero como los sistemas de riego que se emplea no son 100% eficientes, la demanda real (DRC), será igual a la demanda neta, dividida por la eficiencia del sistema de riego de acuerdo con García, Dias Robaina & Calgaro, (2003).

- Demanda Real del Cultivo (DRC):

DNC = 57,96 litros.árbol/día.
DRC = 57,96 / 0,9 = 64,4 litros.arbol/dia.

- Caudal necesario por hectárea:

q = 64,4 litros.arbol.dia-1 x 278 árboles
q = 17903,2 litros por ha

- Tiempo de riego por día (TRD):

TRD = 64,4 litros.arbol/dia / (3 x 4 litros. h-1)
TRD = 5,4 horas/día

Este valor indica que cada hectárea de cultivo deberá ser irrigada durante 5,4 horas por dia en los meses de máximo consumo (diciembre, enero y febrero).

- Número de sectores de riego por día (NSR):

El tiempo de funcionamiento del sistema puede oscilar entre 12-18 horas por día.

NSR = 18 horas / 5,4 horas/día
NSR= 3,3 sectores de riego/día

3.1 Cálculo de bombeo solar directo

Tomando como datos de entrada el caudal necesario por hectárea, y la altura de presión máxima calculada.
q = 17.903,2 litros / ha * (1 ha / 5.4 h) = 3,32 m3/ h
h = 20 m

Con un caudal de 3,32 m3/h y para una altura de 20m la potencia de la bomba sería de 700 w (Fig. 2.).

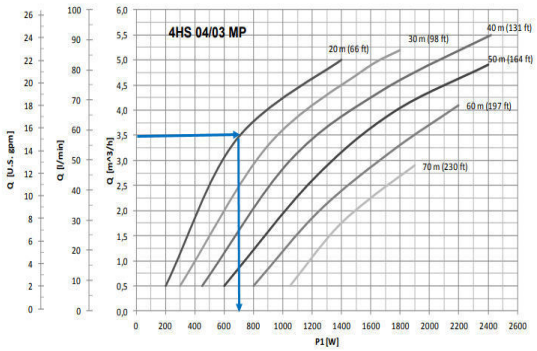


Fig. 2 Curva de operación bomba solar sumergible. Fuente: Sunfields

Se selecciona la bomba sumergible Marca SunFields bomba 4HS 04/03 de 700W de potencia.

El variador integrado en el motor evita el uso de cables de salida blindado y filtros caros de otro modo sería necesario en el inversor con las soluciones en la superficie.

4HS se utiliza tanto en los sectores doméstico e industrial para el suministro de agua, la presurización y el riego, superando las soluciones tradicionales: Energía y dinero, Instalación rápida y fácil, Fiabilidad en el tiempo (Fig. 3.).

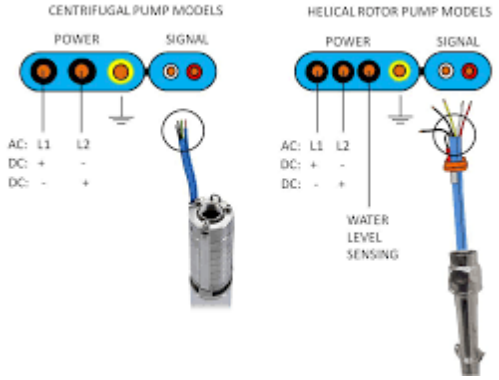


Fig. 3. Bomba solar sumergible 4HS VDC Fuente: https://www.filkabsolar.com.tr/Products/

Motor síncrono de imán permanente con el rotor baño en agua, el estator de resina en capas, integralmente en acero inoxidable AISI 304.

Control través del módulo de CM. variador integrado en la bomba.

Bomba de etapas múltiples completamente de acero inoxidable AISI 304.

Con la bomba seleccionada se realiza el dimensionamiento solar fotovoltaico para seleccionar los componentes que generan la electricidad de la bomba (Fig. 4.)

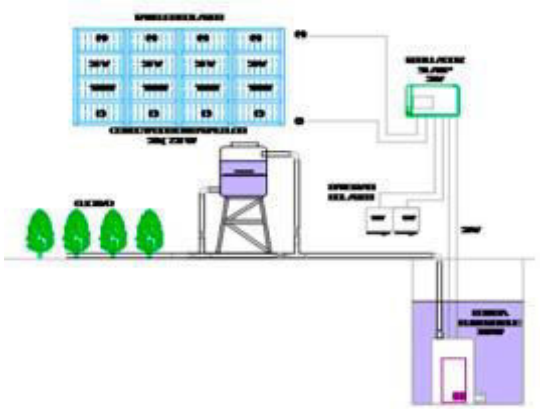


Fig 4. Esquema solar fotovoltaico para bombeo directo a riego o tanque de acumulación. Fuente: Autores

3.2 Dimensionamiento solar fotovoltaico

3.2.1. Paneles solares: Para suplir la demanda de la bomba solar de 700 w, se seleccionan paneles solares monocristalinos de 200w.

E = Eb/ R

E = 700 w / 0,80 = 875 w

Número de paneles = 875 w / 250 w = 3,5
Número de paneles = 4

Se seleccionan paneles monocristalinos por ser más eficientes y por generar electricidad aunque se presente nubosidad, con potencia de 250 w y tensión de 24 voltios. se instalan en paralelo para obtener una potencia total de 1000 wp en las horas de mayor radiación solar.

Buscamos para el departamento de boyacá la irradiación solar promedio anual en la página de datos de la Nasa. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

Asignando las coordenadas de la localización del sitio (Google maps), tomando un año de referencia desde enero 2017 a enero 2018, hallamos las Horas Sol Pico, promedio Anual. Obteniendo como resultado: **HSP = 5,04 Kw-hr/m^2/día**

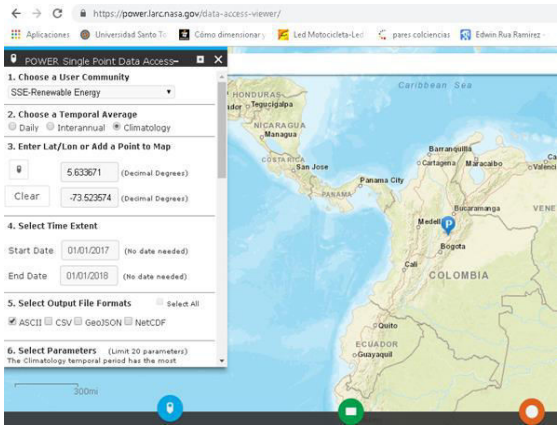


Fig. 5. Datos de irradiación solar. Fuente: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/



Fig. 5. Panel solar monocristalino,

Características técnicas Panel Ecosolar 250W:
Potencia (en Watts): 250W
Voltaje en circuito abierto (Voc): 37,90V
Voltaje de máxima potencia (Wmp): 30,31V
Corriente de cortocircuito (Isc): 8,82A
Corriente nominal (Impp): 8,25A
Sistema de voltaje máximo: 1000VDC
Tipo de célula: Monocristalino
Dimensiones: 166 x 99 x 4 cm
Peso: 17 Kg

3.2.2 Regulador: Para la selección del regulador se suman las corrientes Isc. y se toma el voltaje del sistema (24v)

Isc sistema = 8,82 A x 4 paneles = 35.28 A

Aplicando un factor de seguridad del 25%

Isc Regulador = 44,1 A

Seleccionamos un regulador de 50 A y 24v.
Regulador Blue Solar VICTRON MPPT 100/30



Fig. 6. Regulador. Fuente: https://www.amazon.es /Victron-BlueSolar-MPPT-100-50A

Características Generales:

MPPT (seguidor del punto de máxima potencia)
Reconocimiento automático de la tensión de la batería.
Eficiencia de conversión máxima del 98%
Refrigeración natural por convección
Máxima potencia de salida a temperatura ambiente hasta 40ºC
Apto para baterías de Gel, Inundadas y Selladas
Mando de carga solar para paneles solares de hasta 700 W (12 V) y 1400 W (24 V) hasta 100 V.

3.2.3 Baterías: Para la selección de las baterías determinamos la capacidad nominal, con una profundidad de descarga máxima de 50% y días de autonomía (N) igual a 2. Para un funcionamiento de 6 horas x día

Energía día= 700w * 5h/día = 3500 w/día

Cu = Energía día * N / V

Cu = 3500w * 2 / 24v = 291.66 Amp h

Capacidad nominal = Cu / pd

Dónde: Pd: Profundidad de descarga

Cu = 291.66 Ah / 0,6 = 486.1 Ah

Se seleccionan dos (2) baterías solar de ciclo profundo Power DC de 12v - 510Ah y se conectan en serie para sumar los voltajes (Fig. 7).



Fig 7. Batería solar de ciclo profundo DC de 12v 510Ah. *https://www.monsolar.com/bateria-solar-12v-ciclo-profundo-power-dc.html*

Batería de ciclo profundo de 12v, 510Ah, diseñadas para funcionar con ciclos de profundidad de descarga superiores al 50%. Con una impresionante cifra de más de 1500 ciclos con profundidades de descarga del 50%. Garantía 5 años.

Especificaciones de la Batería:
Voltaje: 12v, Capacidad: 510Ah
Largo (mm): 314
Ancho (mm): 181
Alto (mm): 416
Peso (kg): 51.4

Tabla 1. Dimensiones y peso del equipo

Componente	Dimensiones (cm)	Peso (kg)
Paneles	166 x 99 x 4	17*4 = 68
Bomba		10
Regulador		2
Baterías	31X18X42	2 * 51.4 = 102.8
PESO TOTAL		**182.8**

Fuente: Autores

3.3 Diseño estructural del vehículo:
Para el diseño estructural del vehículo se aplicó la metodología conceptual, partiendo de la necesidad, siguiendo una serie de fases hasta obtener el diseño final (Fig. 8.)

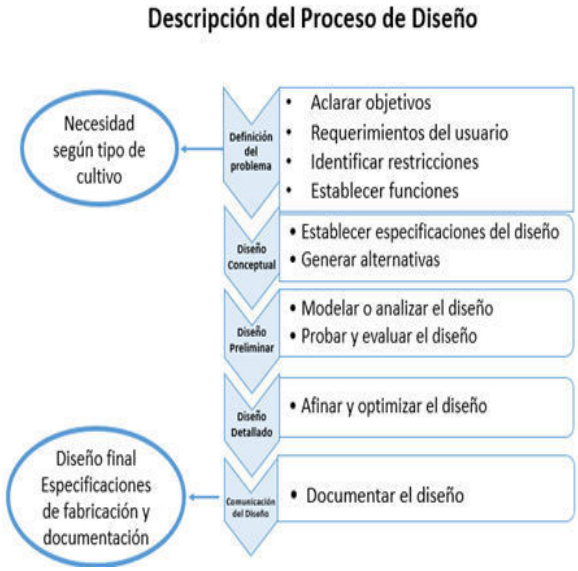


Fig 8. Metodología de diseño. Fuente: Autores

3.3.1 Metodología del diseño:

Para determinar los niveles de importancia entre las necesidades del proyecto y los requerimientos de diseño, se hace el análisis a partir de una matriz Q.F.D. (Quality Function Deployment).

Las necesidades del proyecto se resumen en:

1. Dimensiones del vehículo y sistema de bombeo solar FV
2. Seguridad en la operación del sistema de bombeo solar FV
3. Peso total del vehículo y sistema de bombeo solar FV
4. Costo del vehículo y sistema de bombeo solar FV
5. Mantenimiento reducido.
6. Fácil de transportar el vehículo
7. Captación de la radiación solar

Para determinar la importancia de cada una de las necesidades, se realiza una matriz en la que se comparan los requerimientos entre sí.

Tabla 2. Matriz de ponderación

	1	2	3	4	5	6	7			[%]
1	-	1	1	1	1	1	1	6	6/21	28.6
2	0	-	0	0	0	0	0	0	0/21	0
3	0	1	-	0	1	0	0	2	2/21	9.5
4	0	1	1	-	1	1	0	4	4/21	19
5	0	1	0	0	-	0	0	1	1/21	4.8
6	0	1	1	0	1	-	0	3	3/21	14.3
7	0	1	1	1	1	1	-	5	5/21	23.8
TOTAL								21		100

Fuente: Autores

Los requerimientos de diseño son los siguientes:

A. Materiales
B. Número de partes estructurales
C. Número de paneles
D. Potencia requerida
E. Elementos de control y medición

Tabla 3. Matriz de requerimientos vs necesidades

	[%]	A		B		C		D		E	
1	0,29	3	0,86	0	0	9	2,57	3	0,86	0	0
3	0,1	9	0,86	3	0,29	3	0,29	0	0	0	0
4	0,19	9	1,71	0	0	9	1,71	9	1,71	3	0,57
5	0,05	0	0	3	0,14	0	0	0	0	3	0,14
6	0,14	9	1,29	0	0	3	0,43	0	0	0	0
7	0,24	9	2,14	3	0,71	9	2,14	9	2,14	0	0
			6,852		**1,143**		**7,140**		**4,710**		**0,714**

Fuente: Autores

Analizando la tabla anterior, se observa que los parámetros más importantes para la toma de decisiones respecto al diseño final son en su orden:

1. Área de los paneles solares FV
2. Materiales del vehículo
3. Componentes modulares

3.3.2 Diseño estructural:

Una vez seleccionada la mejor alternativa, se hizo el análisis de esfuerzos, aplicando la teoría de Von Misses, con el fin de generar un diseño más conservativo. En ésta fase también se tuvo en cuenta el aumento en la rigidez de toda la estructura, para optimizar los elementos que la conforman (por ejemplo, triangulación de componentes para transformar esfuerzos de flexión a esfuerzos normales, que generan deformaciones con menores órdenes de magnitud). Para la selección de los materiales se tuvieron en cuenta los criterios del diseñador en cuanto a factores de seguridad y costos. Como resultado se diseñó un medio de transporte manual, práctico, liviano, económico, ergonómico, seguro y confiable.

3.3.3 Teoría de Von Mises (materiales dúctiles).

La teoría de Von Misses dice que la distorsión del elemento es debida a los esfuerzos principales restándoles los esfuerzos hidrostáticos $(\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3})$.

La energía de distorsión es la diferencia entre la energía total de deformación por unidad de volumen y la energía de deformación por unidad de volumen debida a los esfuerzos hidrostáticos.

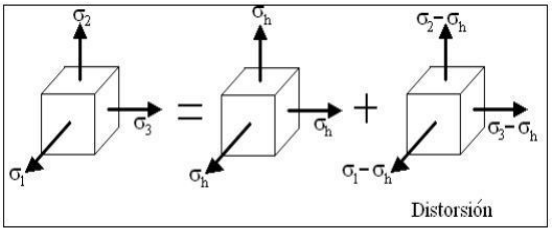


Fig. 9 Teoría de falla para materiales dúctiles. Fuente: De Castro, C. A.

Se realiza el dibujo preliminar en un software CAD teniendo en cuenta los parámetros más importantes en el diseño. (Área de los paneles, materiales del vehículo y componentes modulares).

3.3.4. Dibujo CAD del transporte



Fig. 9. Vehículo en ensamble de sus componentes modulares para instalación de paneles solares. Fuente: Autores



Fig. 10. Diseño de Vehículo modular, preparado para captación solar. Fuente: Autores

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con la caracterización de los cultivos para el departamento de Boyacá, se seleccionaron los árboles de durazno, debido a su representatividad en el sector frutícola de la región para la aplicación del diseño de este sistema de bombeo portátil para riego.

Se seleccionó el municipio de Sotaquira para la implementación del sistema, razón que permitió definir la oferta edafoclimática disponible y a su vez contribuyó en la definición de parámetros vitales para el diseño del sistema de bombeo, como lo fueron: brillo solar, caudal, área de riego, tiempo de riego, y potencia necesaria de la motobomba.

Se definió, como sistema de riego, riego por goteo, de acuerdo con el caudal y el número de unidades de riego por hectárea, situación que facilitó definir el volumen por día y selección de la motobomba sumergible accionada por energía solar fotovoltaica.

De acuerdo a la potencia requerida de la bomba, se seleccionaron el número y tipo de paneles solares fotovoltaicos teniendo en cuenta la localización del proyecto,el brillo solar y la eficiencia de conversión de los paneles.

De acuerdo con la potencia requerida por la motobomba, se seleccionaron dos baterías de 12 voltios y 120 Ah para suplir dos días de autonomía.

Con el fin de proteger las baterías del sistema, se seleccionó un regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking) teniendo en cuenta el voltaje del sistema y la corriente de corto circuito

5. RECOMENDACIONES

Es importante tener en cuenta en el diseño del sistema solar fotovoltaico, sistemas de autolimpieza y protección, esto con el fin de prolongar la vida útil de los paneles solares.

Es vital identificar la topografía y brillo solar, del sitio final en el cual se implementará el diseño, con el fin de optimizar la posición, especialmente el ángulo respecto al sol, de los paneles solares, con el fin de potencializar la captación de radiación.

Es ideal que el sistema de transporte diseñado para el sistema de bombeo sea ergonómico y se pueda posteriormente automatizar, con el fin de disminuir la carga laboral y mejorar las condiciones de desempeño de los operarios del sistema.

La implementación del sistema, requiere de capacitación para los productores, pues en experiencias previas de sistemas de riego, se ha identificado el daño y deterioro de los equipos debido a problemas de manipulación y desconocimiento de operación o funcionamiento de los mismos.

Con el fin de determinar la viabilidad económica del proyecto, se debe evaluar la relación beneficio costo del sistema y establecer el impacto de la implementación de estas nuevas tecnologías en el modelo productivo, que permitan un posterior escalamiento y reproducibilidad en todo el territorio nacional.

REFERENCIAS

Colciencias. (2016). Plan estratégico de ciencia tecnología e innovación del sector agropecuario colombiano 2017-2027. http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/noticias/pectia-2017-actualizado.pdf (Consultado: 10 de septiembre 2018)

DANE. (2014). Tercer censo nacional agropecuario - hay campo para todos. https://www.dane.gov.co/files/images/foros/foro-de-entrega-de-resultados-y-cierre-3-censo-nacional-agropecuario/CNATomo2-Resultados.pdf (Consultado: 8 de septiembre 2018)

De Castro, C. A. Teorías de falla bajo cargas estáticas. *Salamanca: Universidad de Salamanca*. Descargado de http://dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/teorasdefallabajocargasestticas.pdf

García, C., Dias Robaina, A., & Calgaro, M. (2003). Selección de bombas para riego. http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/15630021107114325.pdf (Consultado: 15 de septiembre 2018)

Gobernación de Boyacá. (2018). Localización del departamento de Boyacá. http://www.boyaca.gov.co/prensa-publicaciones/mi-boyac%C3%A1/localizacion (Consultado: 21 de septiembre 2018)

IDEAM, (2018). Mapas gráficos del tiempo y clima, Indicadores climatológicos. http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1772. (Consultado: 19 de septiembre 2018)

MADR-UPRA-Ministerio de agricultura y desarrollo rural, unidad de planificación rural y agropecuaria.. (2018). Departamento de Boyacá. https://drive.google.com/file/d/1iZBQSK5q93uV4GOn2UD1RFQcWjPGlxps/view (Consultado: 5 de septiembre 2018)

Miranda, D. & Carranza, C. (2013). Caracterización, clasificación y tipificación de los sistemas de producción de caducifolios: ciruelo, duraznero, manzano y peral en zonas productoras de Colombia. En: Miranda, D.; Fischer, G.; Carranza, C. (eds). Los frutales caducifolios en Colombia: Situación actual, sistemas de cultivo y plan de desarrollo. Soc. Col. Cienc. Hort. p.87-114. (Consultado: 26 de septiembre 2018)

Observatorio Ambiental de Boyacá. (2018). Sector Ecosistemas y Biodiversidad. http://www.boyaca.gov.co/ambiental/sector-ecosistemas-y-biodiversidad/ (Consultado: 6 de septiembre 2018)

Pinzón, Elberth Hernando, Cruz Morillo, Ana, & Fischer, Gerhard. (2014). ASPECTOS FISIOLÓGICOS DEL DURAZNERO (Prunus persica [L.] BATSCH) EN EL TRÓPICO ALTO.: UNA REVISIÓN. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *17*(2), 401-411. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262014000200011&lng=en&tlng=es. (Consultado: 21 de septiembre 2018)

PNUD. (2011). Colombia rural razones para la esperanza - Resumen ejecutivo: Informe nacional de desarrollo humano 2011. http://www.co.undp.org/content/dam/colombia/doc

s/DesarrolloHumano/undp-co-resumen_ejecutivo_indh2011-2011.pdf
(Consultado: 5 de septiembre 2018)

ESTADO DEL ARTE DE LA REFRIGERACIÓN Y SU EVOLUCIÓN EN LOS TIEMPOS ACTUALES.

STATE OF THE ART OF REFRIGERATION AND ITS EVOLUTION IN CURRENT TIMES.

M en I. Juan C. Ovando Sierra*, Margarita Castillo Téllez*, M en I. Augusto Sánchez Cifuentes, Br. Diego Chim Naal*, M en I. Mauricio I. Huchin Miss***

*Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ingeniería, Proyecto Conacyt – Sener No. 249322. Av. Agustín Melgar S/N, Colonia Buenavista, San Francisco de Campeche, Campeche, México, tel. 052 9818119800 ext. 3030201
E-mail: {jcovando@uacam.mx, mcatill@uacam.mx, mauro_ivan5@hotmail.com
** Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Ciudad de México.
Tel. 052 5556223138
E-mail: augsan@unam.mx

Resumen: Desde tiempos remotos, la humanidad busco maneras de conservar sus alimentos; muchos pueblos bajaban nieve de las montañas, envuelta en paja, para conservar sus alimentos; Con el paso del tiempo la humanidad perfeccionaron las técnicas de refrigeración, llegando a los refrigeradores que conocemos en la actualidad, los principios de la refrigeración como la conocemos ahora, fueron descubiertos a mediados del siglo XVIII por científicos que investigaban otras cosas y no precisamente interesados a la refrigeración. Por ejemplo, Michael Faraday descubrió la licuefacción de los gases al trabajar con amoniaco, William Cullen, creo frio al descubrir reacciones químicas que repelen el calor, y con ello se sentaron las bases para la refrigeración moderna. En este trabajo se presenta el estado del arte de la refrigeración desde sus inicios hasta la actualidad.

Palabras clave: Estado dela arte, Refrigeración, Compresor.

Abstract: Since ancient times, humanity has been looking for ways to preserve its food; many villages were lowering snow from the mountains, wrapped in straw, to preserve their food; With the passage of time humanity perfected the techniques of refrigeration, reaching the refrigerators that we know today, the principles of refrigeration as we know it now, were discovered in the mid-eighteenth century by scientists who investigated other things and not exactly interested to refrigeration. For example, Michael Faraday discovered the liquefaction of gases when working with ammonia, William Cullen, I think cold when discovering chemical reactions that repel heat, and with this the foundations were laid for modern refrigeration. This paper presents the state of the art of refrigeration from its beginnings to the present.

Keywords: State of the art, Refrigeration, Compressor.

Area: (Termofluidos)

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos, la humanidad buscó maneras de conservar sus alimentos. Alejandro Magno, por ejemplo, mandó construir cámaras subterráneas para evitar quedarse sin suministros durante la guerra; muchos pueblos bajaban nieve de las montañas, envuelta en paja, para conservar sus alimentos; también se hicieron cámaras o casas de hielo para luchar contra el paso del tiempo y la descomposición de la comida.

Los griegos comprimían la nieve en pozos que aislaban con paja y ramas de árboles, la nieve comprimida se convertía en hielo para ser usado en épocas de intenso calor. Así conservaban hielo preparado en invierno. Por otra parte, los egipcios e hindúes para producir hielo artificialmente se valían de vasijas de arcilla las cuales llenaban con agua y a lo largo de la noche se colocaban sobre lechos de paja, pero eso sí, tenía que hacer frío durante la noche y desatarse un aire seco ausente de nubes para que derive en la formación de finas capas de hielo en la superficie de las vasijas.

Para llegar a los refrigeradores caseros que conocemos en la actualidad, las máquinas para enfriar han atravesado diversas fases. Muchos de los principios de refrigeración como la conocemos ahora fueron descubiertos a mediados del siglo XVIII por científicos que investigaban otras cosas y no estaban precisamente interesados en el enfriamiento. Por ejemplo, Michael Faraday descubrió la licuefacción de los gases (cambio del estado de una sustancia de gaseoso a líquido) al trabajar con amoniaco. Por la misma época, William Cullen, médico y químico escocés, creó una bolsa de frío al descubrir que algunas de las reacciones químicas repelen el calor, y con ello sentaron las bases para la refrigeración moderna.

Unos años después, el inventor norteamericano Oliver Evans diseñó la primera máquina refrigerante (aunque no lo hizo), que era una versión moderna de la casa de hielo y empleaba los principios descubiertos por Cullen. Por accidente o no, la creatividad surge de la necesidad y casi al mismo tiempo que Evans diseñaba su máquina, Thomas Moore quería trasladar leche, huevo y mantequilla y que llegaran frescos a su destino, para lo que inventó una caja de madera helada: la nevera. Refrigerador antiguo La primera patente de estos refrigeradores rústicos la obtuvo Jacob Perkins en 1834, pero todavía restaba un largo camino antes de llegar a los refrigeradores que conocemos ahora. En la búsqueda del perfeccionamiento de estos aparatos se llegó a cometer algunos errores, como en 1859, que Ferdinand de Carré hizo el primer refrigerador de absorción que usaba amoniaco líquido, un compuesto tóxico. Fue hasta 1879 que Carl von Linde creó el primer refrigerador doméstico, que se comercializó por General Electric hasta 1927. Actualmente los refrigeradores domésticos son modelos más prácticos y amigables con el ambiente, y funcionan a través de un sistema de compresión de gas.

Fue en el siglo XVI que la industria del hielo se consolidó al descubrirse el nitrato de etilo, producto que unido al hielo produce bajas temperaturas. Cuando alguien se dirige a un punto de venta de equipos de aire acondicionado, muchas veces ni siquiera imagina cómo la refrigeración basada en el hielo natural se practicó mucho antes de construirse cualquier máquina térmica que en la actualidad es de uso cotidiano. He aquí un poco de historia de cómo se ha evolucionado hasta llegar a los sistemas de refrigeración actuales.

2. DESARROLLO

Cronología de la evolución de la refrigeración desde tiempos remotos.

Mesopotamia (2000 A.C.): Bodegas en curvas o fosas profundas cavadas para almacenar hielo de ríos congelados y nieve de montañas.
China (1006 A.C.): Bodegas en fosas donde almacenan hielo de ríos congelados que lo cortaban en bloques y las cubrían con paja que actuaba como aislante.
China (618 A.C.): En la época del Rey Tang de la Dinastía Sang crearon un método para mezclar leche con hielo. Estas técnicas también pasaron a la India.
Persia (400 A.C.): Crean un platillo muy frío hecho de agua de rosas y vermicelli (cabello de ángel) que era un flan parecido a un chupete ó sorbete de

pudín de arroz. También almacenaban hielo recogido durante el invierno para utilizarlo en verano, en los almacenes llamados "ya – chal".
Macedonia (330 A.C.): En la corte del emperador Carlo Magno enterraban ánforas con nieve y frutas, para servirlos helados en las comidas.
Italia – Roma (68 D.C.): El emperador Nerón hacía traer nieve de los Alpes para que preparasen bebidas heladas que eran resultado de mezclar nieve, frutas y miel.
Italia – Venecia (1250-1320): Marco Polo trae de sus viajes realizados al lejano Oriente recetas de preparación de bebidas heladas y helados, las cuales se divulgan por toda Italia.
Francia – Paris (1547-1559): El Rey Enrique II se casa con Catalina de Medicis quien había nacido en Florencia, Italia y fue ella la que llevó a Francia personal que preparaba bebidas heladas y helados. Con el tiempo añadieron huevo como nuevo ingrediente en las recetas.
1553 El médico español Blas Villafranca estudió el enfriamiento del agua y del vino por medio de mezclas refrigerantes, nombrando la palabra refrigerar por primera vez.
1607 Se descubrió que una mezcla de agua con sal servía para congelar agua. En el siglo XVII el científico Robert Boyle y el astrónomo Philippe Laire utilizaron mezclas refrigerantes para la investigación científica en laboratorios.
1748 Guillermo Cullen, demuestra la refrigeración artificial en la universidad de Glasgow.
1755 Se inicia la fabricación de hielo en laboratorio.
1755 El escocés William Cullen logró hacer un poco de hielo con vapor de agua en una campana de vidrio en vacío. Dos años más tarde, Gérald Nairne agregó a estos experimentos, ácido sulfúrico y así logró ciertos adelantos.
1774 La primera máquina se construyó en Kinneil, cerca de Boroughstoness en 1774. A partir de entonces la historia de la máquina de vapor será la de la firma Boulton & Watt, y casi todas las mejoras que se introduzcan en ella serán obra del propio Watt.
1805 Un inventor americano, Oliver Evans, diseñó la primera máquina de la refrigeración que utilizó el vapor en vez de líquido. Evans nunca construyó su máquina, pero una similar a él fue construida por un médico americano, Juan Gorrie.
1816 La máquina "Stirling" fue ideada. Este tipo de máquinas pueden utilizar cualquier tipo de combustible, así como energía solar y aporte de tipo térmico. El inventor fue Robert Stirling
1824 Carnot funda la termodinámica; Publicó "Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia". Allí expuso los dos primeros principios de la termodinámica.
1830 Notas encontradas de Sadi Carnot sobre la equivalencia de trabajo y calor por su hermano, después de su muerte y que no fueron publicadas sino hasta el año 1878.
1834 Primer compresor de refrigeración, Jacob Perkins desarrolló la primera máquina de compresión de vapor, cargada con éter etílico. Aunque no se la aprovechó comercialmente sino hasta mucho después, su máquina contenía los cuatro elementos principales que se encuentran en los modernos sistemas de refrigeración; un compresor, un condensador, una válvula de la expansión y un evaporador.
1844 John Gorrie uso su máquina de ciclo de aire para enfriar cuartos en el hospital de Apalachicola, Florida.
1851 Se patentó una máquina para fabricar hielo John Gorrie, médico de Florida, patentó un pequeño sistema de producción de hielo, que utilizó la rápida expansión del aire comprimido en presencia de agua para crear el hielo.
1852 William Thomson (Lord Kelvin) inventó el principio de la refrigeración. Propuso la utilización de las máquinas de producción de frío como sistemas de calefacción, introduciendo el modo de funcionamiento como "bomba de calor", concepto que no ha tenido eco hasta las dificultades energéticas derivadas de las crisis del petróleo, y que no fue aplicado de forma práctica hasta 75 años más tarde por T.G.N. Haldane
1855 Se patenta la máquina industrial frigorífica.
La primera máquina industrial frigorífica por compresión de éter la patentó en 1855, el escocés radicado en Australia, James Harrison.
1859 F. Carrè manufactura hielo mediante compresor de éter etílico.
1862- 1863 Manufactura comercial de hielo en Francia y E.U. usando la máquina de absorción de carre.
1866 En E.U. se transporta por primera vez fresas mezcladas con hielo (Parker Earle). En Francia Edmon Carre diseña el primer equipo de refrigeración comercial usando vapor de agua en vacío (con ácido sulfúrico licuado).

1867 Se usa dióxido de carbono (CO2) como refrigerante en una máquina de compresión de vapor.
1868 Charles Tellier. Se le conoce como el "padre del frío", al inventar en la primera máquina de compresión para producir frío por evaporación de un gas licuable (éter metílico).
1873 David Boyle, desarrolla el primer compresor que usa amoniaco (NH3) como refrigerante.
1876 Un profesor de Física suizo, Raúl Picter, usó el óxido de azufre para lograr un sistema de refrigeración por compresión. Con este sistema, en 1876 se realizó en Londres, la primera pista de patinaje sobre hielo.
1875 La máquina de aire de Gorrie fue perfeccionada por Alexander Kirk en 1862, y en su versión de tipo abierto por Paul Giffard en 1875.
1876 Coleman logra una máquina frigorífica de aire.
1877 Primer embarque frío desde Argentina hacia Europa. Se realiza envío de un buque de carne congelada que partió desde la Argentina hacia Europa.
1878 Primer morgue refrigerada.
1879 Carl von Linde creó el primer refrigerador doméstico, que se comercializó por General Electric hasta 1927.
1898 Crioconcentracion de soluciones farmacéuticas, por fracciones congeladas y separación centrifuga.
1901 Primer tren refrigerador ruso (planta de Linde), segundo en 1908 (planta de Humboldt).
1902 Willis Carrier sentó las bases de la maquinaria de refrigeración moderna y al intentar aplicarla a los espacios habitados, se encontró con el problema del aumento de la humedad relativa del aire enfriado, y al estudiar cómo evitarlo, desarrolló el concepto de climatización de verano.
1906 Se patentó el primer equipo de aire acondicionado en los Estados Unidos, como '' un equipo para tratar el aire``. La primera venta fuera de los Estados Unidos fue para una fábrica de Japón en 1907, iniciando una fuerte expansión del sistema de aire acondicionado en las fábricas y 20 años más tarde en los hogares.
1908 Aparece la primera máquina en utilizar agua como fluido refrigerante, según el sistema de eyección, siendo sus propulsores Leblanc-Westinghouse.
1911, General Electric inició la fabricación de la máquina frigorífica doméstica
"Audiffren".
1935 Paul Becwerel (Francia) en asociación con el laboratorio de criología de Leyden, experimentan con temperaturas de refrigeración muy bajas en ciertos organismos vivientes.
1950 Estudios concentrados en la criopreservacion de esperma humano.
1953 300 bebes americanos nacieron de esperma congelado. .
1963 Trasplante exitoso hecho por F.O. Mueller (gran Bretaña) utilizando una cornea congelada.
1973 El profesor James Lovelock divulgó encontrar cantidades de rastro de gases refrigerantes en la atmósfera.
1974 Sherwood Rowland y Mario Molina predijeron que los gases refrigerantes del clorofluorocarbono alcanzarían la estratosfera alta y allí dañarían la capa protectora de ozono.
1985 El "agujero de ozono" sobre el antártico había sido descubierto y antes de 1990 la predicción de Rowland y de Molina estaba correctamente probada.

3. APLICACIONES DE LA REFRIGERACIÓN

Climatización, para alcanzar un grado de confort térmico adecuado para la habitabilidad de un edificio.

Conservación de alimentos, medicamentos u otros productos que se degraden con el calor. Como por ejemplo la producción de hielo o nieve, la mejor conservación de órganos en medicina o el transporte de alimentos perecederos.

Los Procesos industriales que requieren reducir la temperatura de maquinarias o materiales para su correcto desarrollo. Algunos ejemplos son el mecanizado, la fabricación de plásticos, la producción de energía nuclear.

La Criogénesis o enfriamiento a muy bajas temperaturas' empleada para licuar algunos gases o para algunas investigaciones científicas.

Motores de combustión interna: en la zona de las paredes de los cilindros y en las culatas de los

motores se producen temperaturas muy altas que es necesario refrigerar mediante un circuito cerrado donde una bomba envía el líquido refrigerante a las galerías que hay en el bloque motor y la culata y de allí pasa un radiador de enfriamiento y un depósito de compensación, el líquido refrigerante que se utiliza es agua destilada con unos aditivos que rebajan sensiblemente el punto de congelación para preservar al motor de sufrir averías cuando se producen temperaturas bajo cero.

Máquinas-herramientas: las máquinas herramientas también llevan incorporado un circuito de refrigeración y lubricación para bombear el líquido refrigerante que utilizan que se llama taladrina o aceite de corte sobre el filo de la herramienta para evitar un calentamiento excesivo que la pudiese deteriorar rápidamente.

4. COMPONENTES DEL CICLO DE COMPRESIÓN DE VAPOR

Compresor: El compresor tiene la función de tomar el vapor refrigerante del evaporador a presión y temperatura bajas y elevarlo a una presión y temperaturas superiores, descargándolo en el condensador. El compresor funciona de dos maneras:

- Baja la temperatura del refrigerante en el evaporador de forma que pueda absorber calor.
- Eleva la temperatura del refrigerante en el condensador para que pueda descargar el calor.

Condensador: El condensador está localizado del lado de la descarga del compresor. El vapor del refrigerante caliente entra al condensador proveniente del compresor y sale del condensador como un refrigerante líquido subenfriado la función del condensador es transferir calor que ha sido absorbido por el sistema hacia el aire o el agua.

Los tipos de condensadores que existen son:
Enfriados por aire.

- Tiro natural.
- Tiro forzado.

Enfriados por agua.

- Bajo el punto de vista del sistema.
  - Sistema abierto, usando agua del municipio y eliminándola.
  - Sistema cerrado, usando torres de enfriamiento para recuperar el agua.
- Bajo el punto de vista de construcción.
  - Tubos enchaquetados.
  - Serpentín y cubierta.
  - Tubos y cubierta (de uno o varios pasos).
- Evaporativos

Evaporador: El evaporador proporciona la superficie de calefacción necesaria para que el refrigerante se evapore y absorba calor.
Estos se pueden clasificar de varias maneras ya sea por:

- Por el tipo de construcción.
  - Tubos desnudos.
  - Placas de superficie.
  - Tubos con aletas
- Por las condiciones de operación.
- Por el método de circulación.
  - Inundados.
  - De expansión seca
- Por el tipo de control.
- Por la aplicación, etc.

Para elegir un evaporador se requiere conocer la temperatura diferencial y encontrar el área que a esa temperatura diferencial produzca la carga suficiente.

Válvula reguladora de presión: Las funciones del control de flujo del refrigerante son la de medir el refrigerante líquido, para que pase al evaporador con un flujo igual a la cantidad que se evaporará y la de mantener una presión diferencial entre el lado de alta y de baja presión, para que el refrigerante se evapore a la baja presión deseada y la temperatura correspondiente.

Los tipos básicos de controles son los siguientes:

- Válvula de expansión manual.
- Válvula de expansión automática.
- Válvula de expansión termostática.
- Tubos capilares.

Accesorios: Los accesorios utilizados en los sistemas son:

Filtros.- Los filtros su principal función es detener alguna impureza que se encuentra en el sistema y puede ser de piedras o de sílices.

Recibidor de líquido.- sirve para almacenar el refrigerante en caso de una posible reparación y es un tanque con dos válvulas de servicios.

Separador de aceite: es usada para que el aceite regrese al sistema sin necesidad de ser transportado por el refrigerante hacia el sistema.

Válvula solenoide.- Su función es asegurar que el sistema se pare en caso de que se tenga una fuga de gas.

Diseño de tuberías.- El diseño de las tuberías se consideraran de acuerdo a la configuración de los elementos de refrigeración que se representa.

4.1 Tablas, figuras y ecuaciones

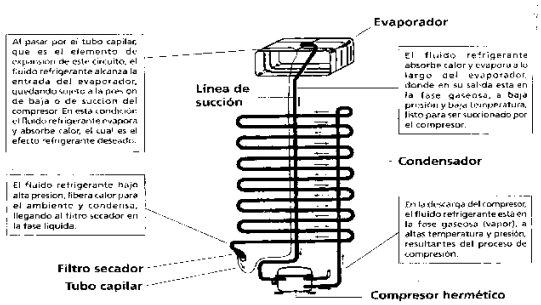


Fig. 1. Sistema de refrigeración doméstica

5. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Instrucciones Básicas para el operador. Deben considerarse las precauciones básicas detalladas a continuación:

1. Verificar las buenas conexiones eléctricas, mecánicas y de refrigeración (contactos correctos, ausencia de conexiones sueltas, que no salten chispas o presencia de ruidos extraños, pérdidas de aceite, etc.).
2. Verificar los consumos eléctricos cuando los equipos estén en marcha (motores, ventiladores, motocompresores y deshielo). Para un buen manejo de una planta es fundamental llevar una bitácora y anotaciones de los consumos, los cuales el encargado puede medir con un amperímetro, dejando nota de las temperaturas ambiente, de sala y otras condiciones de operación.
3. Una vez cada dos o tres días verificar las presiones de trabajo, especialmente cuando existan temperaturas muy altas (30° o 35° Celsius). Se debe verificar el alta y la baja presión, y anotarla en un registro histórico adecuado.
4. Verificar diariamente el nivel de aceite (de preferencia dos veces al día). Especialmente si el presostato de aceite detiene el equipo ocasionalmente. Debe revisarse el correcto funcionamiento del calefactor de Carter.
5. Verificar diariamente la correcta operación del deshielo y el calefactor de desagüe.
6. Verificar semanalmente el nivel de refrigerante (visor y retorno de gas al compresor).
7. Llevar una bitácora diaria de las temperaturas tomadas dos veces al día, a la 8 hrs. y 19 hrs. Si el día es muy caluroso conviene hacer una medición a las 15 hrs. En esta bitácora debe anotarse cualquier otra observación de importancia que llame la atención del operador (consumos eléctricos, sucesos anormales, etc).
8. Una vez a la semana revisar el calefactor de marco, y el funcionamiento de los burletes, así como el accionamiento de la puerta.
9. Preocuparse que las puertas de cámaras y túneles se abran el menor número de veces posibles (cerrarla cuando la dejen abierta), y preocuparse de apagar las luces cuando no haya nadie en el interior.

6. NUEVAS TECNOLOGÍAS

Desarrollo de aplicaciones de la energía solar en sistemas de refrigeración (Refrigeración solar).

Adopción del nuevo refrigerante R-452A una mezcla con hasta 51% menos potencial de calentamiento global.

Refrigeración mediante el aprovechamiento de la energía térmica en pequeños dispositivos (empleo de celdas peltier)

7. CONCLUSIONES

Es evidente que los procesos de refrigeración han ido cambiando con el paso del tiempo en algunos períodos con un gran impacto. Como se platicó en este documento las primeras formas de refrigeración se realizaban con métodos rústicos y conforme avanzaban las investigaciones dentro del área de la refrigeración los procesos y las tecnologías empleadas eran diferentes a los ya normalizados buscando siempre una forma más práctica de refrigerar los objetos en cuestión.

El cambio que se ha estado dado va desde los procesos simples que constituían en únicamente agregar mezclas refrigerantes a procesos más complejos que requieren el uso de maquinaria especializada para realizar distintos procesos dentro del sistema de refrigeración para lograr una refrigeración más eficaz.

En la actualidad se siguen buscando métodos que brinden mejores procesos (procesos más eficientes) que a su vez sean más amigables con el medio ambiente.

REFERENCIAS

Barceló, G. (1972). “Sistemas de producción de frío”. Montaje e instalaciones No. 28 p. 33-40.

Beltrán, F. (1973). “Producción de frío”. Curso de Ingeniería Frigorífica y Aplicaciones de frio. p. 1-4 Madrid.

De Miranda, F. (2010) “Sistemas de refrigeración”. Programa de Ingeniería Mecánica. p. 5-13.

Hernández G., E. (1977). *Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración*, Ed. Limusa, México.

Jennings F., B.H. y Lewis, S.R. (1970). *Aire acondicionado y refrigeración*, Ed. CECSA, México.

Pilatowsky, I. (1993). *Métodos de Producción de frío*, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Woolrich, W.R. (1973) “La historia de la refrigeración”. Montajes e Instalaciones No. 40 p. 39-59.

SITIOS WEB

ACR Latinoamérica. (2018). Thermo Khing adopta nuevo fluido refrigerante R-452. http://www.acrlatinoamerica.com/201808148213/noticias/empresas/thermo-king-adopta-nuevo-fluido-refrigerante-r-452.html?highlight=WyJyZWZyaWdlcmFjaW9uIl0=. (Consultado: 13 de septiembre de 2018)

ESTADO DEL ARTE DEL AIRE ACONDICIONADO Y SU EVOLUCIÓN EN LOS TIEMPOS ACTUALES.

STATE OF ART OF AIR CONDITIONING AND ITS EVOLUTION IN CURRENT TIMES.

M en I. Juan C. Ovando Sierra*, M en I. Augusto Sánchez Cifuentes, Br. Francisco Tec Acevedo*, M en I. Miguel J. Martínez Ruiz*, Br. Gimer Cob Chi**

*Universidad Autónoma de Campeche, Facultad de Ingeniería, Proyecto Conacyt – Sener No. 249322. Av. Agustín Melgar S/N, Colonia Buenavista, San Francisco de Campeche, Campeche, México, tel. 052 9818119800 ext. 3030201
E-mail: {jcovando@uacam.mx, al043991@uacam.mx, al042323@uacam.mx, mjmartin@uacam.mx
** Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Ciudad de México.
Tel. 052 5556223138
E-mail: augsan@unam.mx,

Resumen: Históricamente, los sistemas de aire acondicionado han formado parte importante de las instalaciones mecánicas requeridas para una edificación. En este trabajo encontrará lo mas esencial respecto al aire acondicionado su historia, la evolución de su tecnologías desde sus inicio hasta llegar a las más sofisticadas que hoy en día conocemos, se realiza un análisis de las diferentes tecnologías, en el análisis y selección de un sistema de aire acondicionado es muy importante conocer algunos condiciones de confort a la hora de acondicionar un ambiente de las cuales podemos mencionar, la temperatura, humedad, renovación de aire, espacios disponibles, integración en el edificio, costo inicial, costos de funcionamiento, costos de mantenimiento, análisis del ciclo de vida, entro otras, el objetivo del trabajo es realizar el estado del arte del aire acondicionado desde sus inicios y la evolución de la tecnología eficiente.

Palabras clave: Estado dela arte, aire acondicionado, confort.

Abstract: Historically, air conditioning systems have formed an important part of the mechanical installations required for a building. In this work you will find what is most essential about air conditioning its history, the evolution of its technologies from its inception to reach the most sophisticated that we know today, an analysis of different technologies is made, in the analysis and selection of a air conditioning system is very important to know some comfort conditions when conditioning an environment of which we can mention, temperature, humidity, air renewal, available spaces, integration in the building, initial cost, operating costs, costs of maintenance, analysis of the life cycle, among others, the objective of the work is to realize the state of the art of air conditioning since its inception and the evolution of efficient technology.

Keywords: State of art, air conditioning, comfort.
Area: (Termofluidos)

1. INTRODUCCIÓN

Se entiende por aire acondicionado la creación y mantenimiento de un ambiente que tenga condiciones apropiadas de Temperatura, Humedad, Ventilación y Pureza de aire, de tal forma que se procure el confort térmico de los ocupantes y/o las condiciones térmicas de producción de un proceso especializado.

Los equipos de aire acondicionado pueden clasificarse de varias maneras, aquí se aborda algunas clasificaciones desde un punto de vista que contribuye a entender las oportunidades para ahorro de energía.

Por su tipo de operación, en algunos equipos se sopla aire sobre una parrilla o serpentín frío, inyectando el aire a menor temperatura hacia el recinto que se desea enfriar, la sustancia que produce el frío puede ser un refrigerante o bien agua helada. Por ello podemos hacer una primera clasificación como:

Por inyección de aire frío soplado sobre el refrigerante. Estos son las unidades ventana, los mini Split, las unidades paquete y otras de expansión directa.

Por circulación de agua helada (fan-coil). El equipo enfriador es un sistema central y las unidades interiores son separadas, distribuyéndose en los ambientes a tratar. El agua llega a cada uno de los equipos interiores por sistema de alimentación y retorno. Circula por un serpentín que tiene por un ventilador que sopla el aire frío al ambiente, a través de la rejilla superior del equipo. Cada unidad necesita de una conexión a un circuito de drenaje que eliminará el agua de condensación.

Otra clasificación es tecnológica, de acuerdo al tipo de equipo que se utiliza.

Equipos Individuales Unidades de Ventana Unidades Mini- Split Equipos Paquete Equipos Compartidos o Centrales Unidades Multi- Split Equipos de Expansión Directa Generadores de agua helada enfriados por aire Generadores de agua helada enfriados por agua.

2. HISTORIA DEL AIRE ACONDICIONADO

Cronología del la evolución del aire acondicionado.

En 1842, Lord Kelvin inventó el principio del aire acondicionado. Con el objetivo de conseguir un ambiente agradable y sano, el científico creó un circuito frigorífico hermético basado en la absorción del calor a través de un gas refrigerante.

En 1902, el estadounidense Willis Haviland Carrier sentó las bases del aire acondicionado, aunque no lo parezca hay mucho más de lo que pensamos detrás de esa comodidad que se disfruta en un día cálido de verano o en un día frio de invierno.

En 1915 se formó la compañía Carrier Engenering e inicio la fabricación de productos en 1922 después del logro más significativo en la industria, el equipo refrigerante centrífugo (chiller). El refrigerante centrifugado fue el primer método práctico de aire acondicionado para espacios amplios.
En 1928, Willis Haviland Carrier desarrolló el primer equipo que enfriaba, calentaba, limpiaba y hacía circular el aire para casas y departamentos, pero la Gran Depresión en los Estados Unidos puso punto final al aire acondicionado en los hogares. Las ventas de aparatos para uso residencial no empezaron hasta después de la Segunda Guerra.

Apartir de ese tiempo la evaluación de los sistemas de aire acondicionado y el desarrollo de tecnologías se han eficientado los sistemas, en la actualidad existen tecnología VRF, Inverter que pueden alcanzar un ahorro de energía hasta un 70%.

3. CONSIDERACIONES EN LA SELECCIÓN DE EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

Algunos criterios que deben tenerse en consideración a la hora de acondicionar un ambiente son: temperatura, humedad, renovación de aire, filtración, nivel sonoro interior y exterior, presión, capacidad, redundancia, espacios disponibles, integración en el edificio, coste inicial, costes de funcionamiento, costes de mantenimiento, fiabilidad, flexibilidad y análisis del ciclo de vida.

Debe considerarse que cada criterio está relacionado con todos los demás y que, a la vez, estos criterios tienen valoraciones distintas según cada propiedad y aún según cada obra.

Algunos criterios que básicamente dependen de la propiedad son, por ejemplo: Costo inicial respecto al costo del funcionamiento, frecuencia del mantenimiento necesario y si para efectuar el mantenimiento es necesario acceder en el espacio ocupado, estimación de la frecuencia de fallos, impacto de los fallos y tiempo necesario para corregir los fallos.

Además de los criterios básicos, otros criterios pueden considerarse importantes o condicionantes:

- Si es una instalación que soporta un proceso, por ejemplo: una sala de ordenadores.
- Si es una instalación destinada a una sala blanca o tiene otros condicionantes higiénicos.
- Si es condicionante para la venta.
- Si es condicionante para la obtención de beneficios.

La propiedad podrá valorar estos criterios, si el proyectista le da suficiente información sobre las ventajas e inconvenientes de cada opción. Pero del mismo modo que la propiedad normalmente no conoce las ventajas o inconvenientes de cada sistema, tampoco el proyectista conoce las valoraciones financieras o funcionales que puede dar la propiedad, por ello, esta debe estar involucrada en la selección del sistema.

4. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO

Algunos criterios que deben tenerse en consideración a la hora de acondicionar un ambiente son: temperatura, humedad, renovación de aire, filtración, nivel sonoro interior y exterior, presión, capacidad, redundancia, espacios disponibles, integración en el edificio, coste inicial, costes de funcionamiento, costos de mantenimiento, fiabilidad, flexibilidad y análisis del ciclo de vida.

5. IMPORTANCIA EN LA HISTORIA MODERNA DEL AIRE ACONDICIONADO

Desde la invención del aire acondicionado, podemos controlar el clima si estamos entre paredes y un techo, Desde que nuestros ancestros aprendieron a dominar el fuego, hemos podido mantenernos calientes cuando hace frío.

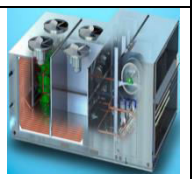
Refrescarnos cuando hace calor, ha sido más difícil. El aire acondicionado se fue convirtiendo en mucho más que una simple comodidad. Sorprendente cuánto los necesitamos. El aire acondicionado es una tecnología transformativa; tiene una profunda influencia en dónde y cómo vivimos. En los 80, EE.UU. usaba más de la mitad del aire acondicionado del mundo. Pero las economías emergentes lo han ido alcanzando: pronto, China será el líder mundial. El boom del aire acondicionado es ventajoso por muchas más razones que la obvia de que los bochornosos veranos son más placenteros con ellos que sin ellos.
Y luego está la electricidad que permite que el aire acondicionado funcione, a menudo conseguida quemando gas o carbón; y muchos de los líquidos de refrigeración que usan son gases invernaderos poderosos si se fugan.

Uno esperaría que la tecnología del aire acondicionado se estuviera volviendo más limpia y verde... y así es.

La demanda está creciendo tan rápidamente que, incluso si los optimistas tienen razón respecto a las posibles mejoras en la eficiencia, habrá un aumento óctuple de consumo de energía para 2050.

5.1 Tablas, figuras y ecuaciones

Tipo de equipo	Definición	Imagen

ventana	Estos equipos son propicios para aplicaciones limitadas de aire acondicionado como por ejemplo acondicionar solo recamaras o pocos espacios dentro de un inmueble donde la gran mayoría de los espacios no requieren de aire acondicionado. El frío se inyecta al cuarto mediante un ventilador que sopla aire sobre el serpentín del evaporador donde fluye el refrigerante a baja temperatura. Cuentan con una sección de inyección y otra de retorno para la renovación del aire.	
Mini split	Son sistemas individuales con uno o más evaporadores, el termino Split viene de que se trata de un equipo dividido. Por un lado, se tiene la unidad compresora junto con el condensador que debe instalarse fuera del cuarto acondicionado y por otro la unidad evaporadora se instala dentro del cuarto que se acondicionará, interconectándolos por medio de dos tuberías de cobre las cuales deberán ir aisladas, así como líneas de control.	
Unidades paquete	En áreas donde se tenga espacio en plafón para paso de ductos, se pueden utilizar unidades tipo paquete debiéndose localizar la unidad en el exterior; podrán ser en capacidades de 3 ,4,5,6,7.5,10,12.5,15,20,25, 30,40 TR. Unidades tipo paquete con bomba de calor en capacidades de 2, 2.5, 3, 4, 5, 7.5, 10, 15, 20 T.R. Unidades tipo paquete con volumen variable solo en capacidades de 25 T.R. en adelante. Se deben utilizar equipos divididos con serpentín por expansión directa en capacidades de 1.5, 2.5, 3.5, 4, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 T.R.	

6. CONDICIONES DE COMODIDAD

El acondicionamiento de aire en términos generales implica un control efectivo de las propiedades física y químicas del aire a fin de producir aire acondicionado de confort. el aire acondicionado se diseña y calcula para producir temperaturas más bajas que la exterior al interior de los locales habitados.

7. ALTA EFICIENCIA EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

Hoy en día existe la tendencia de usar equipos invertir los cuales son las tecnologías más eficientes siempre y cuando esté constituida por los elementos adecuados como por ejemplo el uso de motores variables para el compreso lo cual permitirá a la unidad trabajar mejor. Lo anterior puede aplicarse a unidades domésticas.

Otras tecnologías que pueden trabajar de una manera más eficiente si se realizan instalaciones adecuadamente son la implementación de equipos VRF, tecnología que se emplea desde la década de los 80's. Estas tecnologías van destinada a espacios amplios y puede adaptarse a las necesidades ideales del complejo además de permitir regular las temperaturas en distintos espacios al mismo tiempo.

8. CONCLUSIONES

- La principal premisa que se deriva de este estudio es que decidir cuál sistema es más conveniente es altamente dependiente del proyecto en cuestión. Por ejemplo, mientras mayor sea la cantidad de ambientes relativamente pequeños que requieran un control individual de temperatura para que cada uno pueda tener

sus propias condiciones de confort, más útil será la aplicación de un sistema VRF.

- Los sistemas de aire acondicionado han formado parte importante de las instalaciones mecánicas requeridas para una edificación. Sin estos sistemas, en muchos lugares sería difícil lograr un nivel de confort adecuado para el desenvolvimiento de las actividades cotidianas.
- Para edificios de grandes dimensiones, típicamente se han empleado los sistemas de agua helada por sus conocidas ventajas sobre los sistemas de expansión directa. Expansión directa es el principio de funcionamiento del equipo tipo dividido (comúnmente conocido como por su nombre en inglés: split) y agua helada es cómo funcionan la mayoría de los sistemas de aire acondicionado central de complejos de importantes dimensiones.

.

REFERENCIAS

Hernández G., E. (2007). *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración*, LIMUSA Noriega Editores., México.

Marcombo Ed. (2007). Manual del aire acondicionado.

SITIOS WEB

Foro Frio. Eficiencia energética en equipos y sistemas de aire acondicionado. (Consultado: 13 de septiembre de 2018)

FIDE. Curso Promotores de Ahorro y Eficiencia de Energía Eléctrica, Tema Aire Acondicionado. (Consultado: 13 de septiembre de 2018)

LG Air Conditioning. (04 de Junio de 2016). Aire Acondicionado Split. Obtenido de LG: http://www.lg.com/es/aire-acondicionado-split. (Consultado: 13 de septiembre de 2018)

ACR Latinoamérica. Unidades de alta eficiencia. http://www.acrlatinoamerica.com/201804248169/articulos/aire-acondicionado-y-ventilacion/unidades-de-alta-eficiencia.html. (Consultado: 14 de septiembre de 2018)

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL SISTEMA DE ADMISIÓN DE UN MOTOR HONDA CGL 125 MEDIANTE UN BANCO DE FLUJO ESTACIONARIO

OBTAINING OF THE DISCHARGE COEFFICIENT INTO THE ADMISSION SYSTEM OF A CGL 125 HONDA ENGINE, BY STATIONARY FLOW BANK

Ing. González Lugo César L.[1], Dr. Santiago Ruiz Juventino[2], Dr. González Oropeza Rogelio[3]

Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE) Facultad de Ingeniería, Depto. Termofluidos
Universidad Nacional Autónoma de México.
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ingeniería, Unidad de control de emisiones y vehículos (UNICE).
Av. Universidad No.3000, Col. UNAM, Delegación Coyoacán C.P.04510, Ciudad de México,
Teléfono y Fax: + 52 (55) 56228899 ext 228.
E-mail: ortox132@gmail.com[1], juvensant@hotmail.com[2], rog1950@unam.mx[3].

Resumen: Uno de los parámetros de mayor importancia en el desempeño de las máquinas de desplazamiento positivo, y en particular los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA), es el rendimiento volumétrico (η_v) que es un indicador del vaciado y llenado de los cilindros del motor, a este proceso se le denomina renovación de la carga y está directamente relacionada con las prestaciones del motor, ya que la cantidad de aire introducida al cilindro es la limitante de la potencia máxima del motor. En este contexto, el desempeño de las válvulas es vital para este proceso, y una manera de conocer tal desempeño es el Coeficiente de Descarga, el cual se define como una medida de la permeabilidad del sistema, es decir, la relación del flujo medido experimentalmente con el flujo de referencia o teórico del mismo elemento. Este trabajo describe el funcionamiento de un arreglo experimental en banco de flujo, para medir el coeficiente de descarga contra el levantamiento de válvula en un motor Honda CGL 125 que corresponde a una motocicleta de 4 tiempos. Además, se midió la influencia que tienen: un conducto llamado acoplador, el carburador, la base del filtro y el filtro mismo. Los resultados son claros y de gran interés para el diseño del sistema de admisión.

Palabras clave: coeficiente de descarga, rendimiento volumétrico, diseño del sistema de admisión.

Abstract: One of the most important parameters in the performance of positive displacement machines, particularly the Alternative Internal Combustion Engines (AICE), is the volumetric efficiency (ηv) which is an indicator of the emptying and filling of the engine cylinders, this process is called load renewal and is related to the performance of the engine. In this context, the performance of the valves is vital, and one way to know such performance is the Discharge Coefficient, which is defined as a measure of the permeability of the system, that is, the ratio of the flow measured experimentally with the

reference or theoretical flow of the same element. This paper describes the operation of an experimental arrangement in flow bank, to measure the discharge coefficient against the valve lift in a Honda CGL 125 engine, which corresponds to a 4-stroke motorcycle. In addition, the influence of: a duct called the coupler, the carburetor, the base of the filter and the filter itself. The results are clear and of great interest for the design of the admission system.

Keywords: volumetric efficiency, Discharge Coefficient, admission system design.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado investigaciones para mejorar el proceso de combustión y así reducir las emisiones de NOx y CO2 al medio ambiente. Se ha dado prioridad a las estrategias como lo son: diferentes tipos de inyección de combustible (Sazhin et al., 2006), utilización de nuevos combustibles (Porpatham et al., 2013; Sorate y Bhale, 2014), sincronización variable de válvulas (Fontana y Galloni, 2008), aumento del movimiento de Swirl (Broatch et al., 2015; Prabhakaran et al., 2016; Benajes et al., 2017) y movimiento denominado Tumble (Olmeda et al., 2015), entre otras.

La renovación de la carga busca la efectividad del llenado del cilindro, pues está directamente relacionado con las prestaciones del motor. El aire suministrado durante este proceso debe ser el necesario para realizar la combustión requerida y así lograr valores adecuados de emisiones contaminantes. La cantidad de aire introducido al cilindro es un factor importante para la potencia máxima del motor.

El diseño en los conductos de admisión de los motores es de gran importancia para el proceso de renovación de la carga, estos deben de permitir la entrada máxima posible de fluido al cilindro.
El propósito por optimar el sistema de admisión del motor descansa en el coeficiente de descarga de las válvulas, el cual se define como una medida de la permeabilidad de los sistemas a estudiar, es decir, la relación del flujo medido experimentalmente con el flujo de referencia o teórico del mismo elemento (Ec.1).

$$C_D = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{referencia}} \tag{1}$$

Un grupo de investigadores pertenecientes a UNICE se ha dedicado en el presente documento a la caracterización del sistema de admisión del motor Honda CGL 125, midiendo el coeficiente de descarga.

Para el cálculo se requiere de un área característica de la válvula, la cual puede ser tomada como el área de cortina (Ec.2) o el área de asiento (Ec.3), la diferencia radica en considerar o no el levantamiento de la válvula (Fig.1).

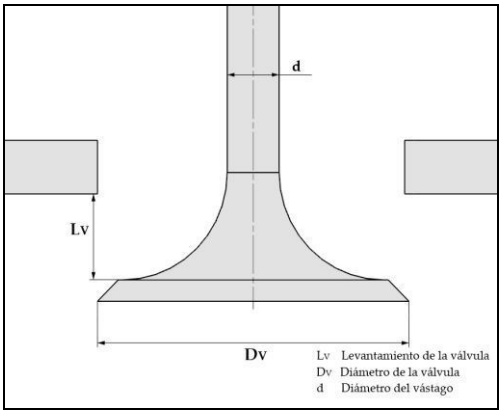


Fig. 1 Nomenclatura de la válvula

$$A_c = \pi D_V L_V \tag{2}$$

$$A_a = \frac{\pi {D_V}^2}{4} \tag{3}$$

En la Fig.2 se muestra la diferencia en gráfica de tomar una u otra área. Para la curva que toma como referencia el área de cortina, se aprecia un cambio notable en la tendencia de ésta, lo cual representa el cambio de régimen de flujo, llegando a un máximo para después decrecer casi linealmente a medida que se aumenta el levantamiento de la válvula; es decir, a poco levantamiento el aire se caracteriza por el contacto que tiene con la propia válvula y el asiento, mientras que a mayor levantamiento se comporta como un chorro libre. Para el caso de la curva que toma como referencia el área de asiento, se nota cómo su comportamiento es asintótico aumentando conforme al levantamiento de válvula (Torregrosa y Giménez, 2015).

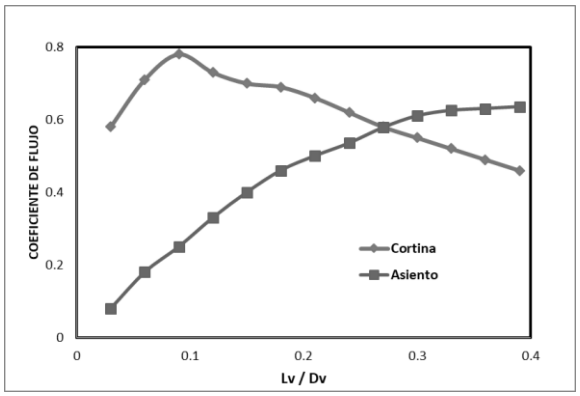


Fig. 2 Comportamiento CD área cortinas y área de asiento

Para el presente trabajo se utilizó el área de asiento, debido a que no es de importancia para esta investigación el comportamiento del flujo cerca de la válvula, sino que se buscaron los valores máximos de coeficiente de descarga para los elementos que conforman el sistema de admisión.

El gasto de referencia se obtiene mediante la Ec.4, en donde se utilizan los parámetros medidos en el banco de flujo. Considerando gas ideal, se calculan los coeficientes con las Ec.5, 6 y 7. También se requiere de la presión atmosférica, la presión en el depósito y la relación entre estas (Ec.8).

$$\dot{m}_{referencia} = A_a\sqrt{GA1\frac{Patm}{Vatm}(E2^{GA2} - E2^{GA3})} \quad (4)$$

$$GA1 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \quad (5)$$

$$GA2 = \frac{2}{\gamma} \quad (6)$$

$$GA3 = \frac{1+\gamma}{\gamma} \quad (7)$$

$$E2 = \frac{PabsDepos}{Patm} \quad (8)$$

El gasto real se calcula directamente mediante las placas de orificio instaladas en el banco de flujo (Ec.9). Los factores F, E y EP (Ec.10, 11 y 12) son relaciones geometricas y de presión que hacen particular el cálculo para este banco de flujo.

$$\dot{m}_{real} = F*E*EP*A_{dia}\sqrt{(2P_{dia}*\rho_{AA})} \quad (9)$$

$$B = \frac{D_{Diaf}}{D_{Tubo}} \quad (10)$$

$$E = \sqrt{(1 - B^4)} \quad (11)$$

$$EP = 1 - (0.41 + 0.35(B^4))\frac{P_{dia}}{\gamma P_{absAA}} \quad (12)$$

2. INSTALACIÓN

El banco de flujo estacionario (Fig.3) permite realizar pruebas de permeabilidad del sistema de admisión del aire que es succionado por el movimiento descendente del pistón, sistema de escape de los gases productos de la combustión, así como caracterizar los torbellinos generados en el interior del cilindro, y la medición del coeficiente de descarga.

El banco de flujo está constituido por un depósito de remanso, una red de tubería, válvulas de bola, manómetros, tablero de válvulas, placas de orificio, termopares y un turbo soplador (Fig. 4).



Fig. 3 Banco de flujo estacionario

El elemento que genera el flujo de aire es un turbo soplador SIEMENS con las características de la Tabla 1.

SERIE	12345 03 96
TAMAÑO	1904 – A
ARREGLO	4
CLASE	U
HP	5
RPM	3500
CAUDAL MÁXIMO	$0.222\ m^3/_s$
PRESIÓN MAXIMA	508 mm c. a.

Tabla 1. Características del turbo soplador

El uso de este turbo soplador en comparación con otro tipo de elementos que proporcionen el flujo de aire que se requiere, por ejemplo, un compresor de pistón es que su caudal es constante, lo cual se ve reflejado a la hora de tomar las lecturas de presión.
Las válvulas en las tuberías nos permiten dirigir el flujo generado para utilizar la placa de orificio más adecuada según sea la prueba que realizar. Una válvula extra permite regular el caudal en el elemento de estudio.
El tablero de válvulas tiene el objetivo de hacer mostrar las lecturas de presión en los puntos deseados de la instalación, esto se logra mediante cierta configuración de las válvulas (abiertas o cerradas).

La instalación cuenta con termopares tipo K, los cuales se conectan al adquisidor de datos Datalogger Agilent 34970A para la obtención de los valores de temperatura.

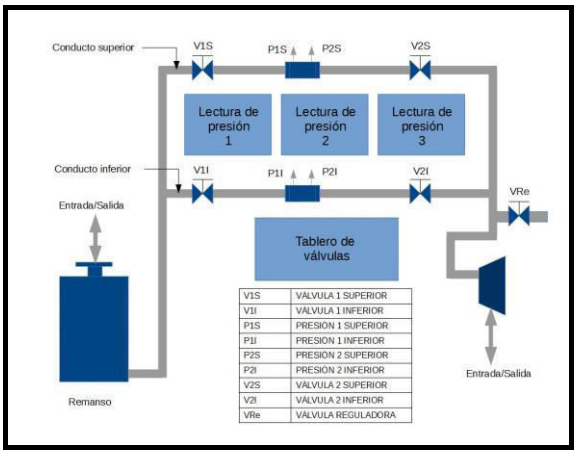


Fig. 4 Esquema general del banco de flujo estacionario

Del banco de flujo se obtienen los datos de caídas de presión y temperaturas en los puntos específicos de la instalación según sea el caso de estudio. Junto con las características del elemento a estudiar, se cuenta con los datos necesarios para evaluar el flujo real y de referencia, y con esto obtener el coeficiente de descarga.
Los datos obtenidos en la experimentación se ingresan a un programa auxiliar de cálculo, para la agilización de la obtención numérica del coeficiente de descarga por cada milímetro de apertura de la válvula.

3. EXPERIMENTACIÓN

El sistema de admisión del motor Honda CGL 125 cuenta con 5 partes: la cabeza del motor, ducto acoplador, carburador, base del filtro y filtro. Los resultados que se buscan con la experimentación son:

- Coeficiente de descarga en cada milímetro de apertura de la válvula de admisión para cada componente del sistema de admisión.
- Levantamiento óptimo de la válvula de admisión.
- Pérdidas en cada uno de los componentes del sistema de admisión.
- Gráficas de CD contra Levantamiento.

- Gráfica comparativa del coeficiente de descarga de todos los componentes que conforman el sistema de admisión.

Los elementos por analizar en el banco de flujo se colocan en la parte superior del depósito de remanso (ver Fig.6). Para conseguir tal fin, es necesario que la culata del motor se acople a un ducto que simule las condiciones del cilindro, el cual a su vez se encuentra montado en el depósito de remanso, esta pieza nos sirve como acoplamiento entre el depósito y el elemento a caracterizar.

Se diseñaron dos placas (superior e inferior) para acoplar la cabeza del motor con los instrumentos necesarios (Ver Fig.5). La placa inferior, cumple con la geometría adecuada para proporcionar un soporte a nivel y así poder colocar los instrumentos de medición y apertura de las válvulas, dejando libre la zona de los muelles de las válvulas de apertura y escape. Ambas placas cuentan con sujeciones a la cabeza del motor.

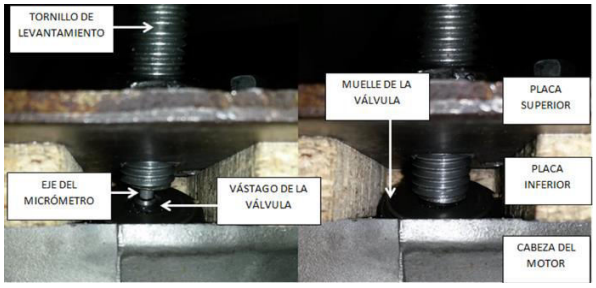


Fig. 5 Acoplamiento de válvula y sistema de levantamiento y medición

Para las mediciones se empieza con la cabeza del motor y posteriormente se acoplan los componentes del sistema de admisión, uno a uno realizando las mediciones correspondientes. Los datos obtenidos se registraron en tablas para los diferentes arreglos de componentes.



Fig. 6 montaje del sistema de admisión

Se realizaron 5 montajes en total, las cuales se nombraron como: 1. Cabeza de motor, 2. Cabeza de motor + Acoplador, 3. Cabeza de motor + Acoplador + Carburador, 4. Cabeza de motor + Acoplador + Carburador + Base filtro, 5. Cabeza de motor + Acoplador + Carburador + Base filtro + Filtro. En la Figura 6 se muestra el montaje completo.

En cada montaje se tomó la lectura de las propiedades en cada milímetro de apertura de válvula, repitiendo cada prueba modificando el caudal en el banco de flujo.

4. RESULTADOS

Para cada montaje se obtuvieron tablas con los valores en cada prueba, como se muestra a manera de ejemplo en la Tabla 2.

Se realizo una gráfica del coeficiente de descarga contra el levantamiento de válvula para cada montaje (Fig. 7-11).

Levantamiento [mm]	Modo	Presión Atmosferica [mmHg]	Temperatura Ambiente [°C]	Presión Aguas Arriba [mmca]	Presión Diafragma [mmca]	Presión Deposito [mmca]	Temperatura Aguas Arriba [°C]	Temperatura Deposito [°C]	Gasto Real [Kg/s]	Gasto referencia [Kg/s]	CD
1	Aspiración	580	19	361	21	360	20.5	20.9	0.00707	0.05559	0.1271
	Aspiración	580	19.1	303	17	305	20.4	20.8	0.00640	0.05137	0.1245
2	Aspiración	580	19.1	328	44	322	20.5	20.9	0.01018	0.05271	0.193
	Aspiración	580	19.2	264	34	260	20.4	20.7	0.00901	0.04757	0.1894
3	Aspiración	580	19.2	294	73	279	20.6	21	0.01308	0.04921	0.2657
	Aspiración	580	19.2	244	60	231	20.6	21	0.01192	0.04493	0.2652
4	Aspiración	580	19.2	262	100	239	20.7	21	0.01529	0.04567	0.3347
	Aspiración	580	19.2	216	84	197	20.7	21.1	0.01408	0.04159	0.3385
5	Aspiración	580	19.2	240	122	210	20.7	20.9	0.01688	0.04289	0.3934
	Aspiración	580	19.2	196	100	172	20.7	21	0.01536	0.03893	0.3944
6	Aspiración	580	19.3	229	132	197	20.7	21	0.01756	0.04158	0.4223
	Aspiración	580	19.3	185	103	159	20.8	21	0.01559	0.03746	0.4162
7	Aspiración	580	19.3	227	132	196	20.8	21	0.01756	0.04148	0.4232
	Aspiración	580	19.3	185	109	159	20.8	21	0.01603	0.03746	0.4279
8	Aspiración	580	19.3	229	130	198	20.8	21.1	0.01742	0.04168	0.4179
	Aspiración	580	19.3	190	108	164	20.9	21.1	0.01595	0.03803	0.4193
9	Aspiración	580	19.3	231	130	199	21	21.3	0.01741	0.04178	0.4167
	Aspiración	580	19.3	182	101	157	21	21.1	0.01544	0.03722	0.4147
10	Aspiración	580	19.3	231	128	200	21	21.2	0.01728	0.04189	0.4125
	Aspiración	580	19.3	189	105	163	20.8	21	0.01573	0.03791	0.4149
10.48	Aspiración	580	19.3	233	128	201	21	21.3	0.01727	0.04199	0.4115
	Aspiración	580	19.4	142	77	123	20.9	20.7	0.01355	0.03302	0.4104

Tabla 2. Características del turbo soplador

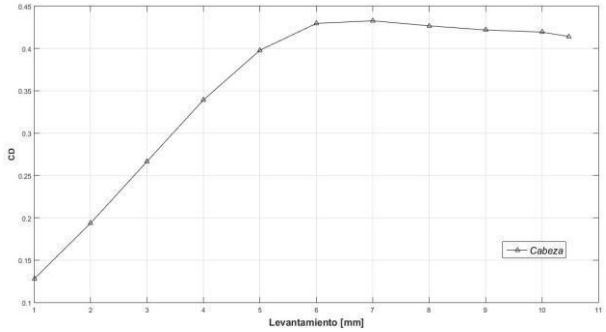


Fig. 7 CD Cabeza del motor

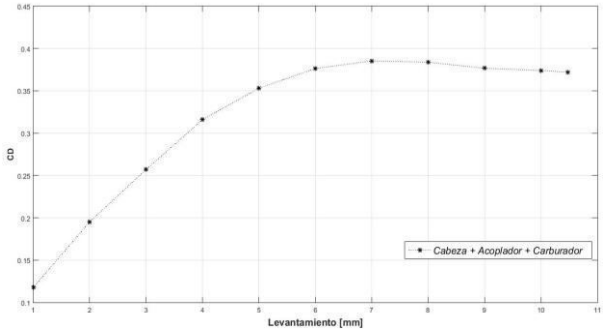


Fig. 9 CD Cabeza del motor, acoplador y carburador

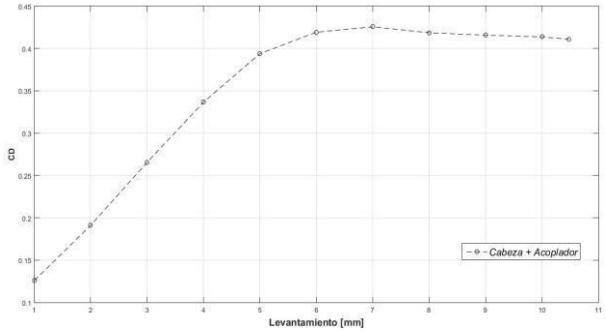


Fig. 8 CD Cabeza del motor y acoplador

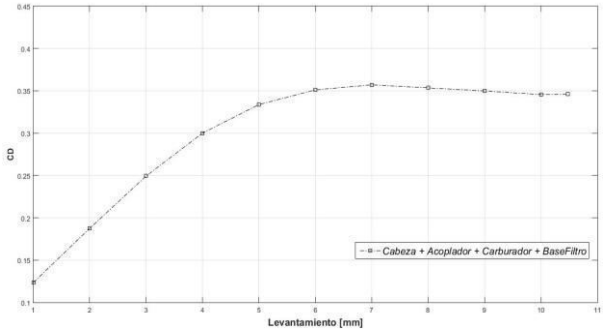


Fig. 10 CD Cabeza del motor, acoplador, carburador y base de filtro

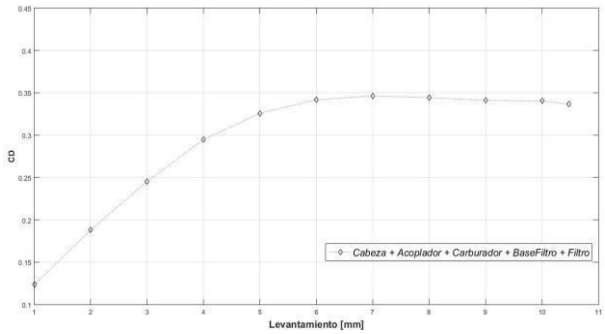


Fig. 11 CD Cabeza del motor, acoplador, carburador, base de filtro y filtro

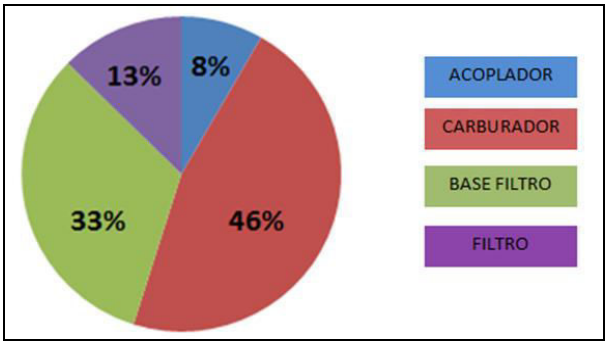


Fig. 13 Pérdidas por cada elemento agregado al sistema de admisión

Los resultados se muestran de manera conjunta en la Fig.12 y se realiza una gráfica del porcentaje de las pérdidas ocasionadas por cada elemento agregado al sistema (Fig.13).

Los máximos valores del coeficiente de descarga obtenidos para los diferentes arreglos experimentales se muestran en la Tabla 3.

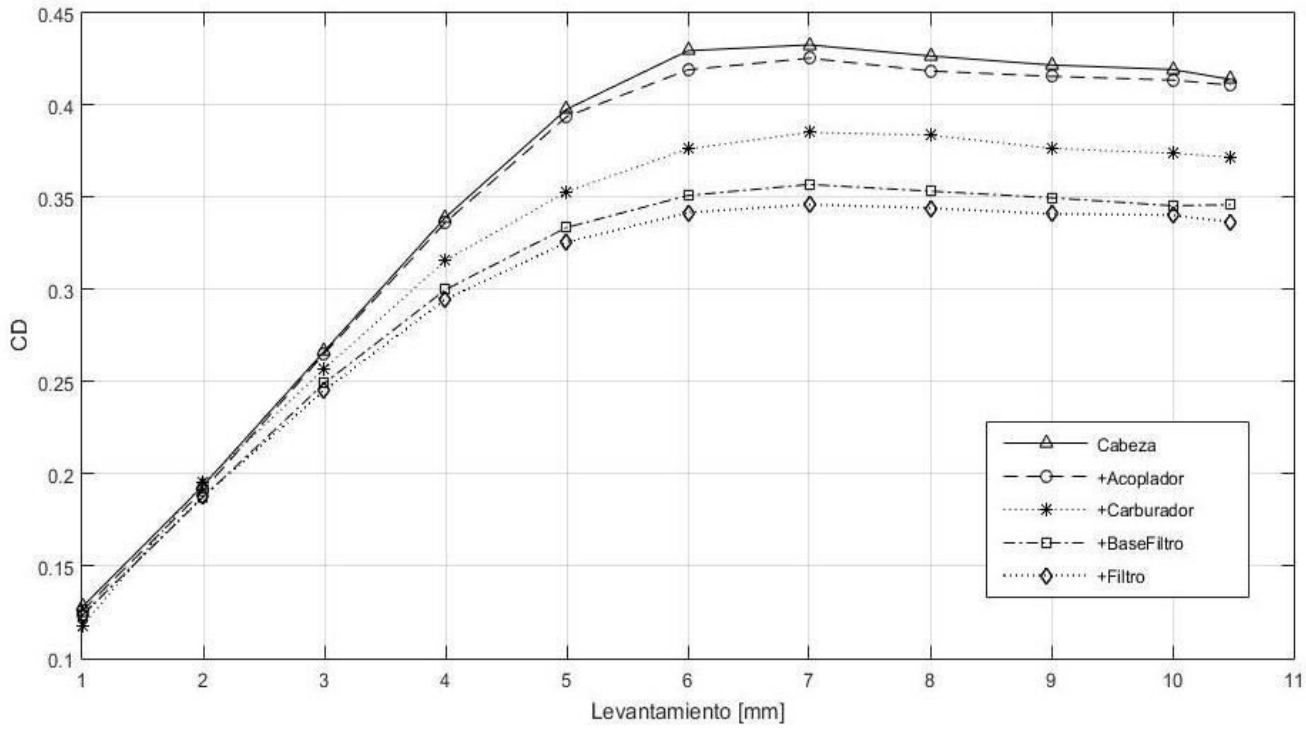


Fig. 12 CD de cada montaje del sistema de admisión

Conjunto	Levantamiento [mm]	CD
Cabeza	7	0.4328
Acoplador	7	0.4256
Carburador	7	0.3853
BaseFiltrro	7	0.3571
Filtro	7	0.3462

Tabla 3. Máximos valores del coeficiente de descarga

4.CONCLUSIONES

A medida que al sistema de admisión se le añaden más elementos, mayores son las pérdidas que ocasionan, lo cual se ve reflejado en una disminución del coeficiente de descarga. Para el sistema estudiado, se obtuvo que a pequeños levantamientos de la válvula estas pérdidas no son notables, pero al aumentar son más significativas.

En las pruebas realizadas a diferentes flujos másicos no se nota un cambio significativo en el coeficiente de descarga, lo cual indica que este no es dependiente del flujo al cual se realizan las pruebas.

La gráfica de la Fig.12 muestra en los cinco ensayos realizados, un comportamiento similar, llegando a un valor máximo para cada ensayo a los 7 [mm] de levantamiento de la válvula, para después decaer y mantenerse prácticamente constante en los siguientes levantamientos.

El carburador y la base del filtro son los elementos que mayor pérdida presentan (gráficamente esto se nota en la separación de las curvas mostradas en la Fig.12 con sus elementos anteriores estudiados).
La Fig.13 muestra claramente las pérdidas originadas por cada elemento agregado al sistema de admisión, sin considerar la cabeza del motor y la válvula de admisión. Para mejorar el sistema de admisión del motor estudiado, se deberá hacer un rediseño del conjunto de elementos que conforman este sistema.

El máximo coeficiente de descarga obtenido es de 0.4328 y se obtuvo en el análisis de la válvula de admisión (cabeza del motor) para un levantamiento de 7[mm], al mismo levantamiento se obtuvieron los máximos valores del coeficiente de descarga en cada arreglo estudiado, lo cual indica que este levantamiento de la válvula es un parámetro que se debe de considerar para posibles rediseños del conjunto del sistema; tener un levantamiento mayor a 7 milímetros no implica una mejora en el llenado del cilindro, por lo contrario, origina una pérdida de potencia debido a la fuerza que necesita desarrollar el sistema de distribución sobre el sistema de apertura de la válvula.

RECONOCIMIENTO

La presente investigación se llevó a cabo gracias al apoyo por parte de los proyectos PAPIIT IG 101018 y PAPIME PE108418 de la UNAM.

REFERENCIAS

Benajes, J., Martín, J., García, A., Villalta, D., & Warey, A. (2017). *Swirl ratio and post injection strategies to improve late cycle diffusion*. Applied Thermal Engineering, España.

Broatch, A., Olmeda, P., García, A., Iborra, J., & Warey, A. (2015). *Impact of swirl on in-cylinder heat transfer in a light-duty diesel.* Energy, España.

Fontana, G., & Galloni, E. (2008). *Variable valve timing for fuel economy improvement in a small.* Department of Industrial Engineering – University of Cassino, Italia.

Olmeda, P., Martín, J., Novella, R., & Carreño, R. (2015). *An adapted heat transfer model for engines with tumble motion.* Applied Energy, España.

Porpatham, E., Ramesh, A., & Nagalingam, B. (2013). *Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled.* Energy Conversion and Management, India.

Prabhakaran, P., Ramesh, P., Saravanan, C., Loganathan, M., & Gunasekaran, E. (2016). *Experimental and numerical investigation of swirl enhancing grooves.* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Annamalai University, India.

Sazhin, S., Kristyadi, T., Abdelghaffar, W., & Heikal, M. (2006). *Models for fuel droplet*

heating and evaporation: Comparative analysis. Faculty of Science and Engineering, School of Engineering, University of Brighton, UK.

Sorate, K., & Bhale, P. (2014). *Biodiesel properties and automotive system compatibility issues.* Department of Mechanical Engineering, S.V. National Institute of Technology, India.

SIMBOLOGÍA

MCIA	Motores de combustión interna alternativos
η_v	Eficiencia volumétrica
NOx	Óxidos de Nitrógeno
CO2	Dióxido de Carbono
UNICE	Unidad de investigación y control de emisiones
CD	Coeficiente de descarga
$\dot{m}_{real}$	Gasto másico real
$\dot{m}_{referencia}$	Gasto másico de referencia
Ac	Área de cortina
Aa	Área de asiento
Dv	Diámetro de la válvula
Lv	Levantamiento de la válvula
π	Número Pi
γ	Relación de calores específicos para el aire
PabsDepos	Presión absoluta en el deposito
Patm	Presión atmosférica
Adia	Área del diafragma o placa de orificio
Pdia	Caída de presión del diafragma o placa de orificio
ρ_{AA}	Densidad del aire aguas arriba del diafragma o placa de orifico
D_{Diaf}	Diámetro del diafragma o placa de Orificio
D_{Tubo}	Diámetro de la tubería
P_{absAA}	Presión absoluta aguas arriba del diafragma o placa de orificio

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

INYECCIÓN ULTRASÓNICA DE GASOLINA

ULTRASONIC GASOLINE INJECTION

Rubén Carlos Esquivel Hernández[*], Milton Carlos Álvarez Sánchez[*], William Vicente[*]

[*] **UNAM,** Instituto de Ingeniería, CIPIA.
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, CDMX, 04510, México.
Teléfono +52 (55) 5623 3600 ext. 8762. Fax +52 (55) 5616 2164.
E-mail: {REsquivelH, MAlvarezS, WVicenteR}@iingen.unam.mx.

Resumen: La atomización ultrasónica de combustibles produce mezclas de partículas más finas y uniformes, por lo que el presente trabajo estudia los cambios en las emisiones de un motor de gasolina de cuatro tiempos equipado con un atomizador ultrasónico de combustible con respecto de su carburador original. El atomizador se diseñó para satisfacer la demanda de consumo de gasolina del motor y un sistema de muestreo se implementó para realizar las mediciones de las emisiones. El atomizador ultrasónico disminuyó las emisiones de CO y CO2 pero elevó los HC.

Palabras clave: Ultrasonido, atomización de combustible, atomización ultrasónica, emisiones contaminantes.

Abstract: The ultrasonic atomization of fuels produces mixtures of finer and more uniform particles. This paper studies the changes in emissions of a four-stroke gasoline engine equipped with an ultrasonic fuel atomizer with respect to its original carburetor. The atomizer was designed to meet the fuel consumption demand of the engine and a sampling system was implemented to perform the measurements. The ultrasonic atomizer reduced CO2 and CO emissions but increased the HC ones.

Keywords: Ultrasound, fuel atomization, ultrasonic fuel atomization, pollutant emissions.

1. INTRODUCCIÓN

La principal forma de producir energía a nivel mundial continúa siendo mediante la ignición de combustibles fósiles (International Energy Agency, 2017). Debido a la contaminación emitida por este proceso, en todo el mundo se están adoptando normativas que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y mantienen estándares de calidad del aire para cuidar la salud pública.

La industria del transporte trabaja principalmente con motores de combustión interna. En el 2013 97% de los automóviles en circulación en el mundo eran de combustión, mientras 2.8% eran híbridos y 0.2% eléctricos. Los pronósticos más optimistas estiman que para el 2025 podría haber 70 millones de vehículos eléctricos en circulación en el mundo. No obstante, tal incremento representará menos del 10% de los vehículos en circulación, no impactando significativamente en la producción de gases de efecto invernadero y emisiones contaminantes (Winton, 2016). La dominación de la combustión en este sector se regula con legislaciones que controlan las emisiones y que

representan nuevos retos para la industria del transporte.

Los motores de combustión interna queman una mezcla de aire-combustible. El tamaño y la concentración de las partículas de combustible afectan la velocidad de combustión, la cantidad de combustible quemado, la temperatura del motor y la auto-ignición de la misma. Tales factores impactan el desempeño del vehículo: eficiencia, potencia, consumo de combustible, operación del convertidor catalítico, y como consecuencia, las emisiones resultantes.

Atomización ultrasónica

Un fenómeno causado por la aplicación de ondas ultrasónicas de alta intensidad en líquidos es su atomización. La producción de neblina es proporcional a la potencia aplicada, mientras que el diámetro de las partículas es función de la frecuencia y las propiedades del fluido.

Respecto a los sistemas de pulverización de combustible modernos, un atomizador ultrasónico puede producir una neblina de partículas con un diámetro más pequeño y una distribución más estrecha (Tanyeri y Öner, 2014). Respecto a la inyección, la atomización ultrasónica no requiere de presurizar el combustible para pulverizarlo, evitando pérdidas del trabajo indicado por la bomba de alta presión. La combustión se beneficia de una evaporación más rápida y completa y de una mezcla homogénea de aire-combustible que reduce las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. El arranque en frío del motor se beneficia de un aumento de temperatura más veloz.

La posibilidad de utilizar ultrasonido como medio de pulverización de combustible ha sido estudiada tanto en trabajos científicos como en publicaciones informales en línea (Furu, 2012).

Namiyama *et al*. (1989) desarrollaron un inyector de gasolina ultrasónico y obtuvieron una mayor eficiencia, mejor aceleración y menores emisiones contaminantes de monóxido de carbono e hidrocarburos, pero un aumento en los óxidos de nitrógeno; realizaron las pruebas en un motor de motocicleta de un cilindro, en un automóvil de cuatro cilindros de inyección monopunto y en un automóvil de cuatro cilindros de inyección multipunto.

Kumar *et al*. (2013) compararon el desempeño de un atomizador ultrasónico en un motor de motocicleta de un cilindro con respecto del carburador original; observando un menor consumo de combustible, mayor eficiencia, menores emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos, pero un aumento considerable en los óxidos de nitrógeno y una capacidad de operar con relaciones aire-combustible de hasta 25:1.

Balasubramanian *et al*. (2015) compararon el desempeño de un motor de dos cilindros con un pulverizador ultrasónico respecto al carburador original y estudiaron el desempeño del motor a diferente velocidades y cargas. Ellos operaron el motor con relaciones aire-combustible de hasta 27:1 y observaron una disminución en las emisiones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, pero un aumento considerable en las emisiones de hidrocarburos.

El presente trabajo es una prueba de concepto sobre el uso de inyectores ultrasónicos como forma de mejorar significativamente el desempeño de los motores de gasolina. Las ventajas del inyector se comprobaron mediante la implementación de un inyector ultrasónico indirecto en un motor de motocicleta Honda 125. El desempeño se juzgó por las emisiones del inyector en comparación con el carburador original del motor. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos de las pruebas del motor.

2. PULVERIZADOR ULTRASÓNICO

Las observaciones experimentales han demostrado que la cavitación y las ondas capilares son los mecanismos causantes de la atomización ultrasónica. Adicionalmente, el fenómeno del viento de cuarzo se presenta en forma de una fuente en la superficie del líquido atomizado (Gallego y Graff, 2015).

Cuando se dirigen ondas ultrasónicas de alta intensidad a una interfaz líquido-gaseosa, aparecen ondas capilares en la superficie. Las oscilaciones crecen hasta que expelen partículas de sus crestas. La longitud de onda de las ondas capilares depende

de la frecuencia de la onda acústica, pudiendo ser el tamaño de las partículas de la neblina uniforme y controlado, y adicionalmente llegar a valores micrométricos.

Para construir el atomizador de combustible se seleccionó un transductor piezoeléctrico de PZT que opera a 1.7 MHz y puede atomizar un gasto de gasolina de 10 ml/min. El diámetro medio de la neblina atomizada, *d*, se evalúa con la *correlación universal*, Ecuación (1), propuesta por Rajan y Pandit (2001). En dicha ecuación ρ es la densidad del líquido, σ la tensión superficial, *f* la frecuencia de la onda acústica, *We* el número de Webber, *Oh* el número de Ohnesorge e *In* el número de intensidad. En el cálculo se consideran las propiedades del transductor, Tabla 1 (PZT Electronic Ceramic Co., 2018), y de la gasolina Pemex Premium, Tabla 2 (Castillo, 2008). El diámetro medio de la neblina se calcula de 24 micras.

$$d = \sqrt[3]{\frac{\pi\ \sigma}{\rho\ f^2}}\left(1 + 0.1\ We^{0.22}\ Oh^{0.166}\ In^{-0.0277}\right) \quad (1)$$

Tabla 1: Propiedades del transductor

Propiedad	Valor
Frecuencia	1.7 *M*Hz
Diámetro	20 *m*m
Espesor	1.2 *m*m
Capacitancia	1.8 *n*F
Voltaje	< 48 V
Gasto	10 *m*l/min
Coeficiente de acoplamiento electromecánico	> 52 %

Tabla 2: Propiedades de la gasolina Pemex Premium

Propiedad	Valor
Densidad	706 *k*g/m^3
Tensión superficial	22 *m*N/m
Viscosidad	0.5 *m*Pa·s
Módulo de compresibilidad	1.125 *G*Pa

El inyector consiste en una cámara de pulverización (Fig. 1e), una trampa de separación (Fig. 1d) y una boquilla que suministra la neblina al colector de admisión (Fig. 1c).

La cámara de pulverización es un depósito de combustible en cuyo fondo se encuentra el transductor (Fig. 1f). En la cámara se atomiza la gasolina y aparece la fuente consecuencia del viento de cuarzo (Fig. 1g). Por los bordes de la cámara ingresa un flujo de aire que arrastra la neblina hacia la trampa de separación. La trampa consiste en un plato invertido que detiene la fuente y contiene las gotas que lanza. Alrededor de la trampa fluye la neblina hacia la boquilla, la cual inyecta al flujo en la entrada del colector de admisión. El flujo de aire es inducido por la succión del motor.

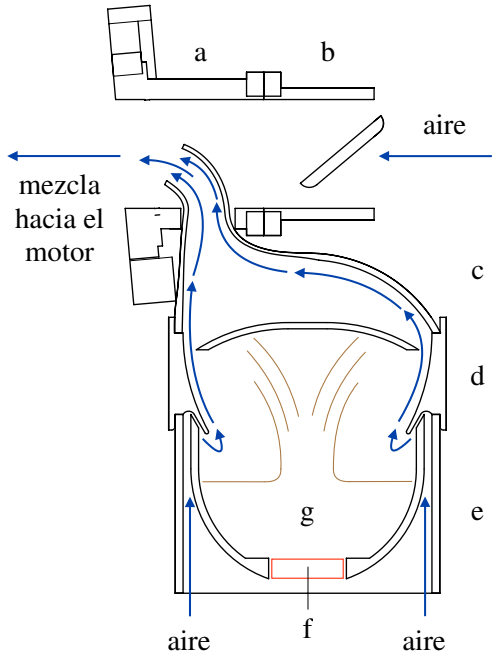


Fig. 1. Operación del inyector ultrasónico: (a) colector de admisión (b) válvula mariposa (c) boquilla (d) trampa de separación (e) cámara de pulverización (f) transductor (g) gasolina

Teniendo en cuenta que el inyector opera en contacto directo con gasolina y con el colector de admisión del motor–el cual tiene una temperatura próxima a 60 °C operando en caliente–se utilizó nylon para elaborar el prototipo empleando manufactura aditiva como proceso de fabricación.

3. ARREGLO EXPERIMENTAL

Las pruebas se realizaron en un motor de ignición por chispa de cuatro tiempos y un cilindro *Honda*

CGL 125; sus especificaciones se enlistan en la Tabla 3 (Moto Honda da Amazônia Ltda., 2001).

Tabla 3: Especificaciones del motor de pruebas

Parámetro	Descripción
Diámetro del pistón	56.5 *m*m
Carrera	49.5 *m*m
Cilindrada	124.1 cm^3
Relación de compresión	9:1
Válvulas	OHV (válvulas en la culata)
Lubricación	Forzada a presión y baño en aceite
Enfriamiento	Forzado por aire
Peso en seco	29.8 *k*g
Encendido	CDI (ignición por descarga de capacitor)

Las emisiones y la velocidad del motor se midieron utilizando un analizador de gases *BrainBee AGS-688*. La temperatura del motor se midió en la superficie de la culata del motor con una cámara termográfica *Fluke Ti400*.

Dados los niveles de monóxido e hidrocarburos que emite el motor, se implementó un sistema de muestreo para tomar medidas representativas de las emisiones. El sistema consiste en un túnel de dilución de acero galvanizado (Fig. 2b). En un extremo del tubo se colocó un ventilador que induce el flujo de aire para la dilución (Fig. 2a), el otro extremo del tubo fungió como puerto de muestreo. El escape del motor se conectó al túnel de dilución (Fig. 2c).

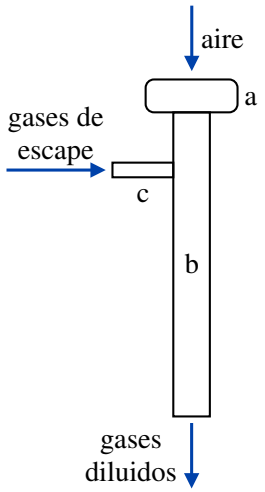


Fig. 2. Esquema del sistema de muestreo: (a) ventilador (b) túnel de dilución (c) escape

En una prueba preliminar, con el inyector ultrasónico, el motor encendió tanto en frío (30 °C superficial en la culata) como en caliente (100 °C superficial en la culata). La velocidad a la que se obtuvo una combustión constante fue de 7 000 rpm.

3.1 Metodología

Para comparar en condiciones estandarizadas el desempeño del motor equipado con los distintos sistemas de admisión, se estableció un protocolo basado en la norma mexicana vigente de verificación de motocicletas (SEMARNAT, 1993). La Fig. 3 muestra el arreglo utilizado para registrar las emisiones.

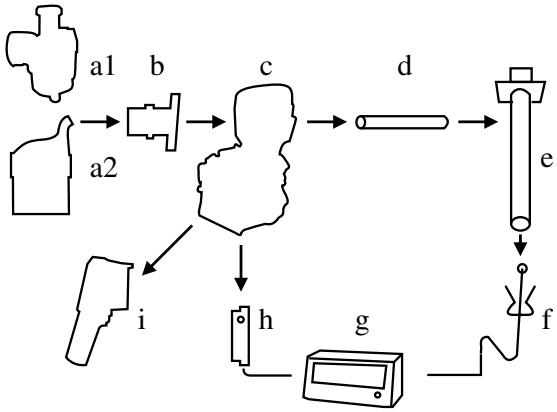


Fig. 3. Esquema del arreglo experimental: (a1) carburador (a2) inyector ultrasónico (b) colector de admisión (c) motor (d) escape (e) sistema de muestreo (f) sonda de muestreo (g) analizador de gases (h) tacómetro (i) cámara termográfica

Las pruebas fueron realizadas en ralentí y la velocidad se ajustó a 7 000 rpm, pues fue la velocidad dónde el motor equipado con el inyector ultrasónico operó de manera más estable.

3.2.1 Preparación del banco de pruebas

1. Abrir el respiradero del cárter.
2. Calibrar el analizador de gases con aire atmosférico.
3. Conectar la sonda al puerto de muestreo (Fig. 3f).
4. Conectar el tacómetro a la bujía (Fig. 3h).

3.2.2 Ensayo de arranque en frío

1. Partiendo de la temperatura ambiente, encender el motor, acelerarlo a 7 000 rpm y mantener esta velocidad (±1 000 rpm).
2. Esperar 20 segundos para estabilizar las mediciones.
3. Registrar las lecturas durante 10 segundos.

3.2.3 Ensayo de operación en caliente

1. Encender el motor y dejarlo operar hasta que alcance 100 °C.
2. Acelerar al motor a 7 000 rpm y mantener esta velocidad (±1 000 rpm).
3. Esperar 20 segundos para estabilizar las mediciones.
4. Registrar las lecturas durante 10 segundos.

4. ANÁLISIS

Las mediciones obtenidas sirven para comparar relativamente los niveles de emisiones. Los valores no son absolutos debido al sistema de dilución, las emisiones reales son mayores. Como consecuencia de la dilución no se midió la relación estequiométrica de la combustión ni las emisiones de NOx.

4.1 Resultados

Tabla 4: Valores medios del ensayo de arranque en frío

Pulverizador Unidades	**RPM** *rpm*	**O2** %	**CO2** %	**CO** %	**HC** ppm
Carburador	7 303	18.59	1.91	0.06	116
Inyector ultrasónico	7 198	19.82	0.98	0.04	1 436

Tabla 5: Desviación estándar del ensayo de arranque en frío

Pulverizador Unidades	**RPM** *rpm*	**O2** %	**CO2** %	**CO** %	**HC** ppm
Carburador	186	0.11	0.09	0.005	13
Inyector ultrasónico	541	0.06	0.06	0.004	65

El inyector ultrasónico produjo un incremento en las emisiones de hidrocarburos y oxígeno, pero una disminución en las emisiones de monóxido y bióxido de carbono (Tabla 4). La velocidad media del motor equipado con el inyector fue menor a la del carburador, más su desviación fue tres veces mayor (Tabla 5). Tal incremento junto con el aumento de oxígeno y la disminución de bióxido de carbono indican una menor cantidad de combustible quemado.

Tabla 6: Valores medios del ensayo de operación en caliente

Pulverizador Unidades	**RPM** *rpm*	**O2** %	**CO2** %	**CO** %	**HC** Ppm
Carburador	7 110	18.84	1.64	0.06	176
Inyector ultrasónico	7 145	19.93	0.92	0.04	1 505

Tabla 7: Desviación estándar del ensayo de operación en caliente

Pulverizador Unidades	**RPM** *rpm*	**O2** %	**CO2** %	**CO** %	**HC** ppm
Carburador	279	0.26	0.20	0.003	22
Inyector ultrasónico	457	0.07	0.09	0.000	45

En el ensayo en caliente el motor mostró un incremento en las emisiones de hidrocarburos para ambos pulverizadores (Tabla 6). No obstante, se observó una disminución en la producción de monóxido y bióxido de carbono. La desviación de la velocidad del motor equipado con el carburador aumentó, mas del inyector disminuyó (Tabla 7). La velocidad media alcanzada con el inyector superó a la del carburador en esta prueba, no obstante, la desviación fue 1.6 veces mayor a la producida por el carburador.

4.2 Discusión

La elevada presencia de hidrocarburos no quemados y el aumento en el oxigeno de la muestra indican fallos en la ignición (*misfiring*). Tal fenómeno provocó que el motor expulsara, en algunos ciclos, la mezcla de aire-combustible sin quemar. Tal inconsistencia en la combustión se corroboró con la mayor desviación en la velocidad del motor equipado con el inyector, pues la combustión no ocurrió de forma continua.

El motor equipado con el carburador disminuyó sus emisiones de hidrocarburos durante la operación en caliente; mientras que el motor equipado con el

inyector, en frío o en caliente, emitió las mismas cantidades. Tal fenómeno, igualmente corresponde con la presencia de fallos en la ignición, pues las emisiones de hidrocarburos del inyector no están ligadas a la temperatura de operación del motor durante la combustión.

Considerando que las emisiones de bióxido de carbono son proporcionales al combustible quemado por el motor, el inyector ultrasónico permitió al motor operar, en promedio, con 38% menos combustible del que requirió para el carburador. A pesar de ello, el motor demandó una mayor cantidad de combustible que no quemó por los fallos en la ignición.

La disminución en el monóxido de carbono reportado se debe, principalmente, a una menor cantidad de combustible quemado.

Al poder generar una neblina más fina de combustible se tiene una combustión más completa, lo que reduce las emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos; así como disminuye el consumo de combustible y aumenta la temperatura de operación del motor. Dicho comportamiento fue obtenido por Kumar *et al*. (2013) y por Namiyama *et al*. (1989).

Un comportamiento similar al observado–los hidrocarburos se elevaron, pero bajaron las demás emisiones contaminantes y el CO–fue obtenido por Balasubramanian *et al*. (2015) quiénes igualmente utilizaron un transductor sumergido en combustible como atomizador, a una frecuencia de 2.4 MHz. Kumar *et al*. y Balasubramanian *et al*. destacan la importancia del control del ingreso de aire para evitar fallos en la ignición, causados por una relación aire- combustible excesivamente alta. Kumar *et al*. controloaron tal fenómeno y reportaron que el atomizador ultrasónico permitió el funcionamiento a relaciones aire-combustible altas, pero a partir de 21 ocurrieron fallos en la ignición y, como consecuencia, los hidrocarburos se dispararon. Balasubramanian *et al*. realizaron sus experimentos a relaciones aire-combustible de 20 a 27, lo cual los llevó a observar grandes cantidades de hidrocarburos no quemados a la salida del motor.

Las emisiones medidas y el comportamiento no constante observado del motor equipado con el inyector ultrasónico demuestran que se trabajó con una relación aire-combustible ligera que no permitió la combustión constante de la mezcla suministrada. Dado lo reportado por Balasubramanian y Kumar, la relación a la que operó el motor fue superior a 21.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un inyector de combustible que pulveriza gasolina mediante vibraciones ultrasónicas para obtener una neblina de combustible con un diámetro medio de 24 micras. El inyector permitió arrancar y operar un motor de un cilindro y cuatro tiempos.

Los valores medidos mostraron una disminución en el monóxido de carbono de 67% tanto para el arranque en frío del motor como para la operación en caliente. Una disminución del 50% en las emisiones de CO2 indican un menor consumo de combustible por parte del motor. Las emisiones de hidrocarburos presentaron un aumento significativo (1 237% durante el arranque en frío y 855% durante la operación en caliente) las cuales indican fallas en la ignición: no todo el combustible se quema y se expulsa como hidrocarburos en los gases de escape. La presencia de fallas en la ignición corresponde con la mayor desviación observada en la velocidad del motor: 3 veces superior durante el arranque en frío y 1.64 veces superior durante la operación en caliente.

5.1 Trabajo a futuro

Se requiere modificar al inyector para obtener una combustión ininterrumpida del motor que permita controlar su velocidad y disminuir las emisiones de hidrocarburos; así como modificar a la instrumentación para poder caracterizar el desempeño del inyector y compararlo con sistemas comerciales:

- Controlar la relación aire combustible de la mezcla.
- Medir el consumo de combustible del inyector.
- Medir la temperatura de operación y tiempo de calentamiento del motor.
- Medir los valores reales de las emisiones.

- Caracterizar el diámetro medio de Sauter de la neblina atomizada.
- Realizar ensayos a diferentes velocidades y cargas.
- Implementar el sistema en un vehículo comercial.

RECONOCIMIENTO

A la UNAM, al proyecto PAPIME PE108418 "Desarrollo de equipo y manuales para prácticas de laboratorio de motores de combustión interna" por la beca recibida que permitió el satisfactorio desarrollo del presente proyecto.

Al proyecto PAPIIT IG101018 "Simulación de la combustión en motores de combustión interna usando biocombustibles, y medición de la masa de contaminantes, a fin de estructurar un inventario de emisiones en el Valle de México" por la ayuda proporcionada para la compra de material.

Al Dr. Fernando Pérez Escamirosa del Departamento de Cirugía de la Facultad de Medicina de la UNAM, por el apoyo otorgado en la manufactura del prototipo.

REFERENCIAS

Balasubramanian, N., Keerthi, G. y Anand, T. N. C. (2015). "Fuelling a Two-Wheeler Engine by Ultrasonic Atomization". Small Engine Technologies Conference & Exhibition, 2015-32-0757.

Castillo H., P. (2008). "Estudio de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos con etanol al 10% y 15% en volumen". Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Gallego J., J. A. y Graff, K. F. (2015). *Power Ultrasonics*, Woodhead Publishing, Sawston.

International Energy Agency (2017). *World Energy Balances 2017: Overview*, OECD Publishing, Paris.

Kumar R., S., Ajay, M. y Anand, T. N. C. (2013). "Studies on a 4-Stroke Spark Ignition Engine with an Ultrasonic Atomizer". 23rd National Conference on I. C. Engine and Combustion, DOI: 10.13140/2.1.3421.0881.

Namiyama, K., Nakamura, H., Kokubo, K. y Hosogai, D. (1989). "Development of Ultrasonic Atomizer and Its Application to S.I. Engines". SAE Technical Paper, 890430.

Rajan, R. y Pandit, A. C. (2001). "Correlations to Predict Droplet Size in Ultrasonic Atomisation". Ultrasonics, **Vol. 39**, No. 4.

SEMARNAT. (1993). *Norma oficial mexicana, que establece las caracteristicas del equipo y el procedimiento de medicion, para la verificacion de los niveles de emision de gases contaminantes, provenientes de las motocicletas en circulacion que usan gasolina o mezcla de gasolina-aceite como combustible*, México.

Tanyeri, B. y Öner, C. (2014). "The Investigation of Using For Gasoline Atomization of Ultrasonic Sound Generated By Piezoelectric Ceramic". Periodicals of Engineering and Natural Sciences, **Vol. 2**, No. 1.

SITIOS WEB

Furu, L. (2012). *Car running on ultrasonic gasoline mist*, YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=n150d9DGtww
(Consultado: 14 de junio 2017)

PZT Electronic Ceramic Co. (2018). *Mist Generation Transducer*, Piezoelements, China.
http://www.piezoelements.com/mist-generation/piezo-transducer-atomizer/mist-generation-transducer.html
(Consultado: 6 de febrero 2018)

Winton, N. (2016). *Global EV, hybrid sales to soar, with U.S. reluctance*, The Detroit News, Estados Unidos.
http://www.detroitnews.com/story/business/columnists/neil- winton/2016/11/25/winton-alternative-fuel-car-sales-estimates/94426704
(Consultado: 7 de agosto 2017)

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

SISTEMA PARA EVALUAR IN-SITU LA CONTAMINACIÓN POR DERIVADOS DEL PETRÓLEO

SYSTEM TO EVALUATE IN-SITU POLLUTION BY PETROLEUM DERIVATIVES

M.Sc. Guillermo José Martínez Miranda[*], M.Sc. Juan Carlos Delgado Sanabria[**]

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Ingeniería Mecánica.
Km 1 Vía Pamplona Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
+57 310 274 8891.
E-mail: guillermojmartinezm@hotmail.com.
[**] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Ingeniería Mecánica
Km 1 Vía Pamplona Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
+57 310 318 5101.
E-mail: jucadesa@hotmail.com.

Resumen: Diseño y construcción de un sistema de monitoreo in situ de contaminación por derivados del petróleo, incluyendo el espectrómetro y la metodología para llevar a cabo una investigación, de la incidencia del derrame de hidrocarburos en suelos. A continuación, se muestran algunos riesgos que se pueden correr tanto para la salud humana, como para los ecosistemas en caso de derrame de derivados del petróleo, la visión de la problemática generada por el sistema y resultados obtenidos a partir de un área en específico.

Palabras clave: Derivados del petróleo, espectrometría, contaminación, sistema in-situ.

Abstract: Design and construction of a system of in situ monitoring of petroleum derivatives, including the spectrometer and the methodology to carry out, an investigation of the incidence of the spill of hydrocarbons in soils. Below are some risks that can be as much for human health as for ecosystems in case of spill of oil results, the vision of the problems generated by the system and the results obtained from a specific area.

Keywords: Petroleum derivatives, spectrometry, pollution, in-situ system.

1. INTRODUCCIÓN

La destilación del petróleo produce gran variedad de derivados, los cuales han hecho parte tanto del beneficio de máquinas en general como de la explotación de materias primas. Si se habla de pos consumo y reciclaje, en muy pocas ciudades colombianas se hace el debido seguimiento de los derivados del petróleo.

Se observa que no hay control de estos contaminantes en la región; las entidades e independientes que manejan estos derivados del petróleo ya sean gasolina, aceites y lubricantes, entre otros, en algunos casos los venden a bajo precio a los campesinos. Por otro lado, un derrame

muy rara vez es controlado y al final todo ese aceite recolectado va a dar a las aguas superficiales y a los suelos.

Las consecuencias para a la salud humana son bastante desalentadoras. Las enfermedades respiratorias y nerviosas se dan por consumo de alimentos y agua expuestos a esta clase de contaminación, mientras el deterioro se entiende por la superficie terrestre.

El sistema de monitoreo in situ de derivados del petróleo busca detectar fácilmente en donde se da mal uso a estos derivados y con qué frecuencia. Al tener una zona afectada se pueden tomar medidas de prevención y mejorar no solo los beneficios propios sino la calidad de vida de los demás.

Es de vital importancia tener en cuenta que factores pueden estar generando gases de efecto invernadero, residuos y consumo general de energía en el medio ambiente. Los derivados del petróleo obtenidos por la destilación de esta materia prima, hacen parte también de los compuestos más destructores del medio ambiente, por ejemplo, en el caso del aceite lubricante automotor, una gota puede contaminar 1000 litros de agua y si se habla de suelos, se encarga de hacerle perder su fertilidad y capacidad de buenas cosechas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, 2006).

El proyecto basado en espectrometría demuestra la forma en la que se desea trabajar, algunos pasos básicos y en miras a replantear un sistema de bajo costo y resultados garantizados para el beneficio de la comunidad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Consecuencias del manejo inadecuado de los derivados del petróleo.

El manejo inadecuado de los derivados del petróleo trae consecuencias negativas ya sean riesgos que puede correr la salud humana, impacto ambiental, tanto en aguas como en suelos, pérdida de fertilidad de suelos y remoción del componente biótico entre otros. Seguido de desglosan aquellos puntos de interés más relevantes que pueden ser prevenidos con los resultados del sistema de monitoreo.

2.1.1. Riesgos a la salud humana

Las diferentes sustancias químicas, que pueden llegar desde el medio ambiente al cuerpo humano, tienen naturaleza química diferente y en base a ella influencian el cuadro clínico, siendo las de tipo liposoluble más activas, dada la constitución lipídica de las membranas de las células. Otros factores como la dosis, la concentración y ritmo de incorporación al cuerpo humano, junto con los factores del individuo como tipo, nivel de salud, edad, tolerancia, susceptibilidad, etc., pueden definir el porqué de la gravedad y evolución clínica, o respuesta al tratamiento en cada caso.

Los destilados del petróleo tienen efectos tóxicos mucho mayores cuando son aspirados al árbol traqueo bronquial, que cuando simplemente se han ingerido. Los productos destilados del petróleo, como la gasolina, son solventes de las grasas y alteran la función de los nervios produciendo depresión, coma y en ocasiones convulsiones. La aspiración directa de estas substancias a los pulmones durante su ingestión parece ser la causa principal de irritación pulmonar. Los efectos de la exposición a cualquier sustancia tóxica dependen de la dosis, duración y de la manera como la persona se exponga y de las características propias del individuo. (Sánchez, 2006, citado por Castro, 2007).

Tabla 1.
Tipos de exposición en la población por contaminación de hidrocarburos (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2004).

Tipos de exposición	Peligros/Síntomas agudos	Primeros auxilios
Inhalación	Vértigo, somnolencia, vómitos, perdida del conocimiento	Acercar a la persona a un ambiente donde pueda respirar aire limpio, requiere reposo
Piel	Absorción, enrojecimiento, quemaduras cutáneas	Quitar las ropas contaminadas Aclarar y lavar la piel

		con abundante agua y jabón
Ojos	Enrojecimiento, dolor, quemaduras profundas graves	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor abdominal, sensación de quemazón, diarrea, nauseas, shock o colapso	Enjuagar la boca y proporcionar asistencia medica

2.1.2. Riesgos en ecosistemas

Los efectos tóxicos de los hidrocarburos en el ambiente dependerán de:

- La cantidad y composición del petróleo.
- La frecuencia y tiempo de exposición.
- El estado físico del derrame.
- Las características del sitio donde sucedió el derrame.
- Variables ambientales como temperatura, humedad y oxígeno.
- El uso de dispersantes químicos (está restringido su uso).
- La sensibilidad de la biota específica del ecosistema impactado (SEMARNAT, 1996).

Los riesgos en los ecosistemas se resumen en la afectación de la calidad del aire, suelos y aguas subterráneas y superficiales, y perdida de flora y fauna.

2.2. Espectrometría, fundamentos y características

La espectrometría se realiza por medio del análisis del espectro de luz generado por un movimiento ondulatorio; este último representara la variable independiente medida en nanómetros (nm) y la variable dependiente se medirá por medio de la intensidad de cada color dentro del espectro generalmente en porcentaje.

El estudio buscará demostrar que algunas muestras expuestas a un haz de luz, presentan picos altos o una intensidad mayor en determinado color del espectro y seguido, si la prueba es positiva, dar la posibilidad de diferenciar un derivado del petróleo de otro.

2.2.1. Espectrómetro

El espectrómetro, espectrofotómetro o espectrógrafo, es un aparato capaz de analizar el espectro de frecuencias característico de un movimiento ondulatorio. Se aplica a diferentes instrumentos que operan sobre un amplio campo de longitudes de onda. (James, 2007).

2.2.2. Espectro de luz visible

Se llama espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible: un típico ojo humano responderá a longitudes de onda de 400 a 700 nm, aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 hasta 780 nm. (Thomas, 2005).

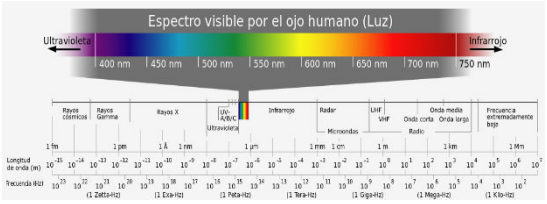


Figura 1. Espectro visible por el ojo humano. (Thomas, 2005).

2.2.3. Líneas de Fraunhofer

En espectrometría, ciencia que combina la física y óptica, las líneas de Fraunhofer son un conjunto de líneas espectrales nombradas en honor al físico alemán Joseph von Fraunhofer (1787-1826) que fue el primero que las estudio. Las líneas se

observaron originalmente como bandas oscuras en el espectro solar.

El químico inglés William Hyde Wollaston fue la primera persona, en 1802, en observar la aparición de una cierta cantidad de bandas oscuras en el espectro solar. En 1814, Fraunhofer redescubrió las líneas de forma independiente y comenzó un estudio sistemático y medición cuidadosa de la longitud de onda de estas bandas. En total, describió alrededor de 570 líneas y asignó a las bandas principales las letras de la A a la K, y a las más delgadas con otras letras.

Más adelante, Kirchhoff y Bunsen descubrieron que cada elemento químico tenía asociado un conjunto de líneas espectrales, y dedujeron que las bandas oscuras en el espectro solar las causaban los elementos de las capas más externas del Sol mediante absorción. Algunas de las bandas observadas también las causan las moléculas de oxígeno de la atmósfera terrestre. (González, 2006).



Figura 2. Clasificación de las líneas de Fraunhofer. (González, 2006).

Dentro de la clasificación resaltada en la imagen anterior podemos encontrar los siguientes elementos químicos con su determinada longitud de onda:

- 1. Calcio a 431nm
- 2. Hidrogeno beta (alto contenido energético) a 486nm
- 3. Hierro a 527nm
- 4. Sodio a 589nm
- 5. Hidrogeno alfa (bajo contenido energético) a 656nm. (González, 2006).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño y construcción del espectrómetro

El diseño y construcción del espectrómetro se llevó a cabo de una forma artesanal o de bajo costo. A continuación se detallan los materiales utilizados para su construcción y el acabado final del mismo.

3.1.1. Materiales

a) Cámara web: Para el desarrollo del proyecto se utilizó una cámara web Full HD 1080p Genius USB.



Figura 3. Cámara web Full HD 1080p Genius USB. (Fuente: Autor)

b) Laser violeta: Este laser posee una longitud de onda de 405nm, ideal para el proyecto ya que es la longitud de onda visible más baja que puede captar el ojo humano.



Figura 4. Laser violeta 405nm tipo lapicero. (Fuente: Autor)

c) Rejilla de difracción: Se utilizó una porción de DVD ya que sus propiedades para difractar la luz son excelentes.

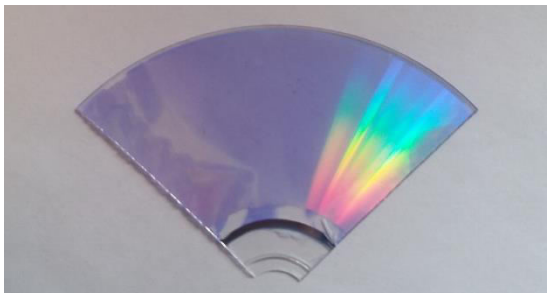


Figura 5. Rejilla de difracción. (Fuente: Autor)

d) Switch: ideal para mantener encendido o apagado el láser ya que no viene con esa opción.



Figura 6. Switch de dos posiciones. (Fuente: Autor)

e) Caja de pilas: Se utilizó una caja de pilas AAA, fuente de energía requerida por el láser.



Figura 7. Caja de pilas AAA. (Fuente: Autor)

f) Recipientes de vidrio: Se utilizaron recipientes de vidrio tipo esmalte de forma cuadrada con medidas de 5.3x2.8x2.8cm con tapa.



Figura 8. Recipiente de vidrio. (Fuente: Autor)

g) Aceite mineral: Se escogió como diluyente de las muestras de suelo este aceite debido a que es incoloro y no reactivo frente a la longitud de onda del láser, debido a su bajo número de átomos de carbono.

h) Hisopos: Utilizados para la recolección de muestras.

i) Caja de madera: se utiliza para introducir el sistema del espectrómetro y generar una oscuridad total para la calidad de las imágenes.



Figura 9. Caja de madera. (Fuente: Autor)

3.1.2. Resultado final del montaje

En la imagen del montaje a continuación se puede apreciar que la cámara y la rejilla de difracción, deben quedar a 45° de inclinación con respecto al haz de luz del láser y el espacio adecuado para colocar las muestras.

Por otra parte todo el sistema se pintó de color negro para no generar un espectro borroso.



Figura 10. Montaje final del espectrómetro. (Fuente: Autor)

3.2. Diseño del software para el sistema de monitoreo

El software para llevar a cabo la captura del espectro visible de las muestras y generar con claridad la gráfica de Intensidad (%) vs Longitud de onda (nm), se realizó en MATLAB. A continuación se muestra la ventana GUIDE creada, en la que puede interactuar el investigador.

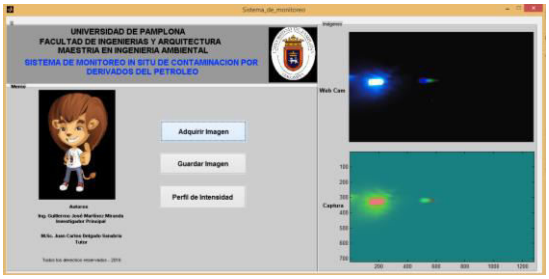


Figura 11. Ventana interactiva GUIDE en MATLAB. (Fuente: Autor)

3.3. Protocolo para el análisis de muestras

Dentro de los casos de estudio, se seleccionó para este artículo, la zona más afectada en ese caso corresponde a la zona d (venta de gasolina en el Km 1, vía Pamplona-Bucaramanga).



Figura 12. Zona d, venta de gasolina en el Km1, vía Pamplona-Bucaramanga. (Fuente: Autor)

Esta zona corresponde a los establecimientos que suministran gasolina, funcionando desde hace más de una década, en donde también se realiza el mantenimiento a buses antiguos.

El suelo de estudio representa manchas incidentes tanto de gasolina como de aceite lubricante usado en una considerable distancia y se tuvo en cuenta para un estudio con un mayor número de puntos de muestreo.

3.3.1. Localización de puntos de muestreo

Para la zona de estudio se escogió el modelo de distribución sistemática regular, que consiste en realizar un grillado de determinada medida por unidad cuadrada (1 m2) y en el centro de cada punto se tomó una muestra.

3.3.2. Número de puntos de muestreo

Para el objetivo y alcance de la investigación se tomó el número adecuado de puntos para la zona, debido a que las áreas de estudio presentan manchas heterogéneas a simple vista, por esa razón algunas muestras representan más contaminación que otras y algunas una contaminación bastante baja. Para esta zona se escogió un número de 30 puntos de muestreo.



Figura 13. Zona d, puntos de muestreo del 1 al 30. (Fuente: Autor)

3.3.3. Número de muestras por punto de muestreo

El número de muestras por punto de muestreo se hizo proporcional al número de puntos de muestreo.

Los grillados fueron hechos en dos dimensiones tomando muestras de la superficie. Por esa razón se tomó una muestra por cada punto de muestreo, siendo suficiente para resultados extensos en áreas pequeñas.

3.3.4. Análisis de fluorescencia en pruebas de referencia

Una vez las muestras estén disueltas en aceite mineral y libres de burbujas, podemos colocarlas

frente al haz de luz del láser violeta de 405nm, si la muestra tiene algo de contaminación por derivado del petróleo, generara una línea fluorescente revelada por la presencia de hierro, oxido, hidrogeno, entre otros componentes químicos dentro de la misma, siendo características naturales del aceite usado por desgaste de partes mecánicas, en las cuales los carbonos en número elevado para estos derivados (entre 30 y 50 átomos) se revelan al entrar en contacto con una longitud de onda cercana a la ultravioleta. (Marsh, 1987).

En la *Figura 14.* se muestra la reacción de las muestras frente al laser de 405nm. De izquierda a derecha: muestra de suelo contaminado, muestra con una gota de aceite lubricante usado, aceite mineral virgen.



Figura 14. Fluorescencia por contaminación. (Fuente: Autor)

3.3.5. Gráfica de Intensidad vs Longitud de onda

Seguido, se colocan las muestras en el espectrómetro para analizarlas. Una vez se ha logrado capturar y guardar el espectro de una muestra determinada, el software prosigue a generar la gráfica de Intensidad medida en porcentaje (%) vs Longitud de onda medida en nanómetros (nm). Para las pruebas de referencia tenemos como ejemplo la *Figura 17.*

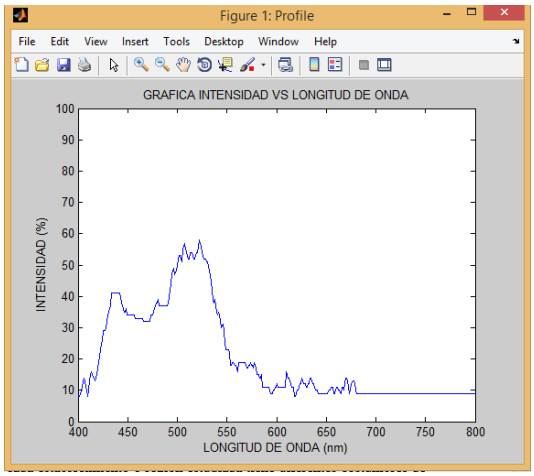


Figura 15. Gráfica de Intensidad vs Longitud de onda. (Fuente: Autor)

La grafica anterior pertenece a la prueba de referencia de una muestra con suelo contaminado de aceite lubricante usado.

3.4. Curva de calibración

Por lo general para el análisis mediante espectrofotometría, es posible preparar curvas de calibración permanentes. Esto se refiere a que una curva de calibración puede usarse con varios lotes de análisis, durante varios meses. Se prepara una nueva curva de calibración, cuando los patrones muestran un cambio en la pendiente o cuando se comienza a usar un nuevo lote de reactivos. (Harris, 2001).

Las curvas de calibración pueden ser lineales y no lineales. En la mayoría de casos, cuando la curva es lineal se aplica la Ley de Beer. Para definir la curva de calibración que mejor representa la relación entre la intensidad (I) y la concentración (C) se pueden usar cálculos de regresión lineal de la siguiente manera:

Dado que $I = mC + b$ (1)

Donde:

I = intensidad
C = concentración

Se puede demostrar que:

$$m = \frac{n\Sigma IC - \Sigma I\Sigma C}{n\Sigma C^2 - (\Sigma C)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\Sigma I}{n} - m\,\frac{\Sigma C}{n} \quad (3)$$

Donde:

m = la pendiente de la curva de calibración (también conocida como factor de calibración).

b = la intersección del valor de absorbancia o del eje y.

n = el número de observaciones (lote de valores de C y de A). (Harris, 2001).

Aunque estos cálculos pueden realizarse manualmente, resulta mucho más conveniente utilizar una computadora o una calculadora manual para elaborar el análisis de regresión.

En algunos casos, se puede corregir el blanco; entonces, de cierto modo se cambia el procedimiento analítico para utilizar solamente el factor de calibración. En otras palabras, en un lote de análisis se procesan tanto las muestras como el blanco, luego se substrae el valor de intensidad del blanco del mismo valor de muestra. La concentración de la muestra se calcula por medio de la ecuación (4) de la siguiente manera:

$$C = \frac{I}{factor\ de\ calibración} \quad (4)\ \text{(Harris, 2001).}$$

3.4.1. Curva de calibración para derivados del petróleo

Se tomaron en cuenta 10 muestras para realizar la curva de calibración. Los recipientes tienen una capacidad volumétrica de 10ml, en donde, la muestra 10, indica 9ml de aceite mineral y 1ml de aceite lubricante usado. Seguido la muestra 9, posee 9ml de aceite mineral y 1ml de la muestra 10, la muestra 8 contiene 9ml de aceite mineral y 1ml de la muestra 9 y así sucesivamente hasta llegar a la muestra 1.



Figura 16. Muestras para la curva de calibración. (Fuente: Autor)

La prueba 10 representa el valor de 10^-1 ml del reactivo en este caso el aceite lubricante usado. También se tiene en cuenta que para valores relacionados a esta muestra, tienen un grado de concentración 10 o una intensidad de 100%, así sucesivamente para la muestra 9, representa 10^-2 ml y un grado de concentración 9.

Cada una de las muestras fueron analizadas en el espectrómetro, de manera que cada una de ellas representará un porcentaje o pico de intensidad correspondiente. A continuación se muestran los valores para cada una de ellas en la gráfica de Intensidad vs longitud de onda generada por el software creado. Cabe resaltar que la muestra 10, posee una contaminación muy incidente para generar la fluorescencia del láser, por esa razón se tomó como una intensidad del 100%.

Los picos de intensidad generados por cada muestra se pueden tabular para así, lograr la curva de calibración, la regresión lineal de la función y el coeficiente de correlación lineal para la contaminación de derivados del petróleo en suelos.

Tabla 2.
Intensidad para cada uno de los grados de concentración. (Fuente: Autor)

Concentración	Intensidad (%)
Grado 1	0,27
Grado 2	0,38
Grado 3	0,41
Grado 4	0,45
Grado 5	0,53
Grado 6	0,59
Grado 7	0,71
Grado 8	0,78
Grado 9	1
Grado 10	1

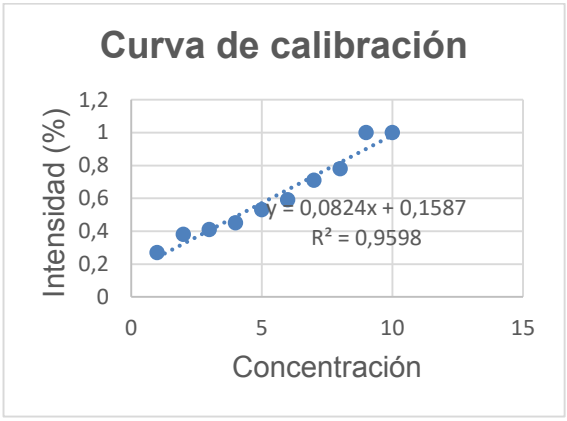


Figura 17. Gráfica curva de calibración Intensidad vs Concentración. (Fuente: Autor)

En la *Figura 17.* se puede apreciar una correlación de los datos, en mayor parte, entre los grados 4 y 8 de concentración, en donde el coeficiente tiende a 1 (0,9598), siendo este, una característica ideal del espectrómetro para la mayor exactitud posible de los resultados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según las gráficas arrojadas por el software creado, se puede concluir en base a los grados de concentración de la curva de calibración, que tan incidente puede llegar a ser un derrame de algún derivado del petróleo, calculando la concentración a partir de la fórmula (4), tomando como factor de calibración el valor generado en la *Figura 17.* mostrado en la fórmula (5), (0,0824) y la intensidad será el valor pico de intensidad para cada una de las muestras.

y = 0,0824x + 0,1587 (5)

Acorde al resultado de la regresión lineal, se realizó el ajuste de los grados de concentración con respecto a la formula (5), para las zonas de estudio.

Tabla 3.
Ajuste de grados de concentración con respecto al porcentaje. (Fuente: Autor)

Intensidad (%)	Grados de concentración
0	0
10	1,21
20	2,42
30	3,64
40	4,85
50	6,06
60	7,28
70	8,49
80	9,71
90	10,92
100	12,13

Para la zona de estudio escogida, se muestran los resultados de las pruebas más relevantes clasificadas como la de más baja contaminación y la más alta, teniendo en cuenta la prueba 21d y 28d respectivamente.

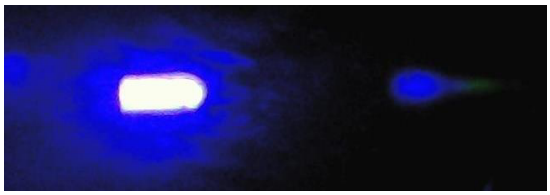


Figura 18. Espectro generado para la prueba 21d. (Fuente: Autor)



Figura 19. Gráfica de Intensidad vs Longitud de onda para la prueba 21d. (Fuente: Autor)

I = 0,46
B = 0,0824

$$C = \frac{0,46}{0,0824} = 5,58$$

Concentración entre los grados 5 y 6.



Figura 20. Espectro generado para la prueba 28d. (Fuente: Autor)



Figura 21. Gráfica de Intensidad vs Longitud de onda para la prueba 28d. (Fuente: Autor)

I = 1
B = 0,0824

$$C = \frac{1}{0{,}0824} = 12{,}13$$

Concentración mayor al grado 10.

4.1. Contaminación general para la Zona d

Para la zona de estudio escogida, se muestra los resultados generales, con los grados de concentración que se encuentran en cada una de las 30 muestras tomadas.

Tabla 4.
Grado de concentración para las muestras de la Zona d. (Fuente: Autor)

Muestra	Grado de concentración
1	10,8
2	8,73
3	5,21
4	8,49
5	5,58
6	6,06
7	9,1
8	7,16
9	9,22
10	9,95
11	7,76
12	8,37
13	7,03
14	6,43
15	6,55
16	4,97
17	6,06
18	5,94
19	6,91
20	4,97
21	5,58
22	5,21
23	6,31
24	11,52
25	7,88
26	12,13
27	12,13
28	12,13
29	10,67
30	10,43

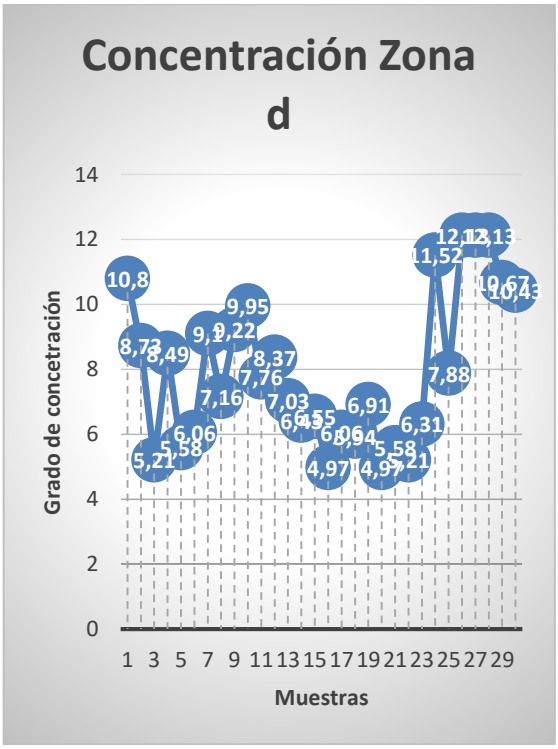


Figura 22. Grados de concentración, Zona d. (Fuente: Autor)

En esta zona de estudio, más de la mitad del área estudiada posee una contaminación alta catalogada desde grado 6 en adelante, también con grados de concentración mayores a 10, quiere decir que la zona está siendo totalmente descuidada. Aparte de ser un establecimiento de venta de gasolina y A.C.P.M., también hacen mantenimiento de buses antiguos en donde no se controla el riego de aceites o lubricantes usados para dichos vehículos.

Es una zona que por ubicación y relieve, tiene una pendiente y es un factor positivo a la hora de filtrarse cada derivado del petróleo en las superficies. Por otra parte se ven en la parte de arriba del establecimiento, unas cosechas de maíz bastante deterioradas a consecuencia de la perdida de fertilidad del suelo.

5. CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo in-situ de contaminación por derivados del petróleo, lleno todas las expectativas propuestas desde su construcción, creación de un software original, metodología, hasta la producción de resultados eficientes que permitieran una visión clara de los contaminantes que existían en cada muestra de suelo y la intensidad con la que pueden intervenir en la destrucción del medio ambiente. Cabe resaltar específicamente el logro de cada uno de los objetivos trazados para este informe.

- El diseño y construcción del equipo, generó resultados claros, con respecto a las imágenes de espectros visibles capturadas y se puede decir que su calibración es óptima para las muestras que contienen derivados del petróleo.
- Se presentó una metodología con una serie de pasos sencillos que permiten determinar la concentración de las muestras analizadas.
- Para la toma de muestras se optó por el muestreo de distribución sistemática regular, ya que se pretende abarcar zonas extensas.
- Se diseñó un programa en MATLAB que permite procesar las imágenes de espectros capturados desde una web cam, para lograr una visión clara en gráficas de Intensidad vs Longitud de onda.
- Se demuestra que con la metodología y software propuestos, se puede llegar a diferenciar las zonas afectadas por contaminación, determinando los grados de concentración, como se muestra para el estudio en la zona d, quien tiene intensidades mayores al 60%.
- La curva de calibración planteada, aportó credibilidad a los resultados, especificando en que grados de concentración se puede encontrar una muestra determinada con respecto al porcentaje de intensidad que arroja el software creado, teniendo como características optimas, la exactitud y alcance del mismo, logrando detectar concentraciones de grado 1 (0,000000001 ml de derivado del petróleo presente en una muestra).
- Se obtuvo un sistema de monitoreo in situ, con el cual se pudo evaluar de manera inmediata, el estado de contaminación de zonas expuestas a derivados del petróleo, presentándose como una prueba rápida de inspección.
- Por último, todas las zonas y muestras pudieron ser analizadas y concluidas para así, dar prestigio al sistema de monitoreo in-situ de contaminación por derivados del petróleo como una novedosa opción en ésta región en la que se presenta el desecho inconsciente de estos hidrocarburos, en relación con el deterioro ambiental y las enfermedades que se pueden estar produciendo.

Referencias Bibliográficas

González, G.; Wesley, J. (2006). El planeta privilegiado: Cómo nuestro lugar en el cosmos está diseñado para el descubrimiento. Palabra. ISBN 9788482399898. Consultado el 15 de diciembre de 2015.

SERMANAT, (2003), NOM-138-SERMANAT/SS-2003. Límites Permisibles de Hidrocarburos en Suelos as Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 4-10P.

Castro, G. (2007), Informe final diseño monitoreo frente derrames de hidrocarburos, Gobierno de Chile, 148P.

Alcaldía mayor de Bogotá D.C., (2004). Protocolo Distrital de Primera Respuesta a Incidentes por Derrame y/o Fuga de Hidrocarburos. Colombia, Comité Operativo Distrital De Prevención Y

Atención De Emergencias, Bogotá D.C., 28P.

James, J, (2007), Spectrograph Design Fundamentals, Cambridge University Press Editorial, Reino Unido.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial, (2006). Manual Técnico para el manejo de aceites lubricantes usados, Convenio 063 de 2005, Gobierno de Colombia, 86P.

Marsh, E. (1987) Recommended Reference Materials for the Realization of Physicochemical Properties (Blackwell Scientific Publications, Oxford).

Thomas, J. (2005) Bruno, Paris D. N. Svoronos. CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts. CRC Press.

Sánchez, C. (2006). Manual De Intoxicaciones: Intoxicación Por Hidrocarburos. Publicaciones del Grupo de Trabajo de Intoxicaciones. Barcelona, España, Capitulo 15, 1-3P.

Harris, D. (2001) "Análisis Químico Cuantitativo", 2ª edición. Editorial Reverte, España.

.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

DISEÑO DE UN SECADOR HÍBRIDO SOLAR-BIOMASA PARA MANZANAS EN EL MUNICIPIO DE NUEVO COLÓN BOYACÁ

DESIGN OF A HYBRID SOLAR-BIOMASS APPLE DRYER FOR THE MUNICIPALITY OF NUEVO COLÓN BOYACÁ

Saúl Andrés Hernández-Moreno[*], Sergio Cano-Andrade [**], Edwin Torres-Díaz[*], Edwin Rúa-Ramírez [*]

[*] **Universidad Santo Tomás - Tunja,** Facultad de Ingeniería Mecánica
Grupo de Investigación: GIDINT
Cll. 19 Nº 11 - 64 Tunja - Boyacá, Colombia
(8) 7440404, saul.hernandez@usantoto.edu.co
[**] **Universidad de Guanajuato,** Departamento de Ingeniería Mecánica, Salamanca, GTO 36885, México, +52 (464) 647 9940 Ext. 2374, sergio.cano@ugto.mx

Resumen: El proceso de secado de manzanas requiere un alto consumo de energía, por lo que se es necesario evaluar diversas fuentes de energía que promuevan la reducción del impacto ambiental, como es el caso de las energías renovables. La energía solar y de biomasa son fuentes energéticas renovables cuya disposición es de gran beneficio en el proceso de secado de manzanas, evitando efectos negativos en el ambiente que son consecuencia de alteraciones en el clima y por consiguiente en las plantaciones. El objetivo de este trabajo es el diseño de un secador hibrido solar-biomasa, el cual se usa para secar manzanas en el municipio de Nuevo Colón Boyacá. El diseño se basa en la minimización del peso y el costo de la cámara de secado para obtener un proceso de fabricación más práctico, tomando como referencia el comportamiento térmico y fluidodinámico del secador.

Palabras clave: Secador de manzanas, biomasa, deshidratación, energía, ambiente.

Abstract: The apple drying process requires a high consumption of energy; thus, it is necessary to evaluate various energy sources that lead to the reduction of environmental impact, as is the case of renewable energies. Solar energy and biomass are renewable energy sources that bring great benefits to the process of apple drying, avoiding negative effects to the environment such as changes in the climate, and therefore, in the plantations. The goal of this work is the design of a solar-biomass hybrid dryer, which is used to dry apples in the municipality of Nuevo Colón Boyacá. The design is based on the minimization of weight and cost of the drying chamber to come up with a simpler manufacturing process, taking as a reference the thermal and fluid behaviors of the dryer.

Keywords: Apple dryer, biomass, dehydration, energy, environment.

1. INTRODUCCIÓN

El secado de frutas es un proceso importante para asegurar la calidad de éstas ya que ayuda a conservarlas para consumirlas en periodos de escasez (Almada, 2005). La principal actividad económica de Nuevo Colón, Boyacá, Colombia (ver Figura 1) es el cultivo de frutales caducifolios (pera, durazno, manzana y ciruela) (Sosa, 2018), siendo la manzana uno de los frutos que más se cultiva. Esto trae como consecuencia la necesidad de diseñar dispositivos y procesos óptimos para el secado de manzanas y evitar su desperdicio al extender la vida útil de éstos frutos cosechados.

Los métodos tradicionales para el secado de las manzanas es colocar los frutos sobre una manta o tabla de madera al aire libre, o colgar las rodajas de las manzanas sobre un hilo, aprovechando el calor del ambiente (Almada, 2005) para su deshidratación y secado. Sin embargo, estos procesos son muy lentos debido al alto nivel de humedad en el ambiente de la región, ocasionando un mal secado. Muchas veces, el alto contenido de humedad en el ambiente también ocasiona la pérdida de las manzanas.

Existen diferentes tipos de dispositivos para el secado de frutas, sin embargo cada uno se ajusta a variables ambientales específicas del territorio donde se emplee el secado, como la radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, entre otras. Generalmene, para el secado de manzanas, se utilizan los mismos equipos que se usan para secar otro tipo de fruta, lo que indica un mal manejo del secado de manzanas. Por esta razón, se ha abarcado una investigación sobre las condiciones climáticas de Nuevo Colón en Boyacá, con el fin de diseñar un secador hibrido solar-biomasa, con el fin de aprovechar las energías renovables. La implementación del secado por medio de la energía calorífica producida por la biomasa, aumenta la eficiencia del dispositivo en su proceso de secado y contribuye a reciclar los residuos de la poda de los árboles frutales que se usa para controlar el crecimiento de los mismos, garantizando la producción de la fruta. El uso de energía limpia reduce la contaminación, garantizando el benéfico económico del productor Boyacense.



Figura 1. Localización global del municipio de nuevo Colón (Sosa, 2018).

En la cámara de secado se plantea minimizar el peso y el costo de la cámara de secado, facilitando su traslado y su proceso de fabricación. El comportamiento térmico y fluido dinámico en el secador son usando como base para el análisis. Inicialmente se realiza una optimización paramétrica estructural del secador. Ésta optimización aumenta el desempeño del secador reduciendo costos, por medio de la combinación de parámetros de entrada y variables de diseño. La función objetivo es definida en base a la superficie de la carcasa de la cámara de secado, sujetándola a restricciones de los análisis previos de diseño, cumpliendo con las características de funcionamiento y homogeneidad de temperatura.

La energía solar y de biomasa son fuentes energéticas renovables cuya disposición es de gran beneficio en el proceso de secado de manzanas, debido a que este tipo de energías no contaminan o su producción de CO_2 es mínima, evitando efectos negativos en el ambiente, tales como alteraciones en el clima, y por consiguiente, en las plantaciones.

La deshidratación de frutas es una rama de la agroindustria que ha sido muy poco explorada en Colombia, debido a la permanente oferta de frutas frescas en el mercado nacional, existiendo una tasa de penetración de importaciones del 84,4%, de acuerdo al reporte del Observatorio Agrocadenas de Colombia del 2003, (Mahecha, 2011).

2. DISEÑO DEL SECADOR

El diseño del secador se basa en una cámara de secado cilíndrica, la cuál disminuye el costo de fabricación y peso de los materiales utilizados. Además, la distribución del flujo del aire es importante para el secado de las manzanas. Se establece que el flujo sea laminar para garantizar un secado homogéneo. Se usa un colector solar para calentar el aire antes de entrar a la cámara de secado, ya que convencionalmente los secadores industriales usan combustibles para secar mientras que los secadores de baja temperatura utilizan energía solar y biomasa (Puertas, 2005).

2.1 Selección de la forma de la cámara de secado

Se plantea una metodología de diseño conceptual y un parámetro de optimización en el diseño estructural de la cámara de secado, buscando una mejor distribución del flujo de aire que circula en la cámara secando las manzanas.

La optimización paramétrica se plantea buscando una función objetivo para minimizarla, reduciendo el peso del material de la cámara de secado. De esta forma se elige la superficie y se encuentra una geometría que ocupa mayor área con menos material, con el fin de colocar más producto a secar. Se plantean dos propuestas en la forma de la cámara de secado, las cuales son un cilindro y un paralelepípedo. Se selecciona un cilindro ya que se manejan menos variables para utilizar la metodología de optimización y facilitar su fabricación.

2.2 Diseño de la cámara de secado

Se elige la forma cilíndrica de la cámara de secado, ya que se tiene mayor área para poner más rodajas de manzanas a secar, también debido a que se adapta mejor al desarrollo de la metodología de optimización paramétrica, ya que la función objetivo está en función de las variables de diseño y el cilindro tiene menos variables, como el diámetro (d), la altura (h), y el paralelepípedo tiene más variables, que son tres lados L_1, L_2, y L_3. Las restricciones de diseño se plantean según las investigaciones de diseño de dispositivos para secar frutas, a partir del análisis preliminar del secador en el transcurso del desarrollo del proyecto durante un año, cumpliendo con parámetros como cantidad de trozos de manzana a secar, fácil traslado del dispositivo, fácil construcción y ergonomía. Se plantea la función objetivo en la superficie del cilindro, tal como:

$$s = \frac{\pi}{2}d^2 + \pi dh \quad (1)$$

Sujeto a

$$d \leq 80\ cm \quad (2a)$$
$$h \leq 100\ cm \quad (2b)$$
$$v \leq 300000\ cm^3 \quad (2c)$$

El volumen del cilindro se obtiene como

$$v = \frac{\pi}{4}d^2h \quad (3)$$

Introduciendo la Ecuación (3) en la Ecuación (1), la superficie queda expresada en función de la altura y el volumen, y la función objetivo queta tal como

$$s = 2\frac{v}{h} + 2\sqrt{\pi hv} \quad (4)$$

Para encontrar el mínimo de la función, se deriva la superficie respecto a la altura y se iguala a cero, tal como

$$\frac{ds}{dh} = -2\frac{v}{h^2} + h^{-\frac{1}{2}}\sqrt{\pi v} = 0 \quad (5)$$

De la Ecuación (5), se despeja la altura en función del volumen, obteniendo como resultado

$$h = \left(\frac{4v}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

El volumen se reemplaza en la Ecuación (6), obteniendo como resultado el valor óptimo global de la altura con la que se tiene una superficie mínima. Así mismo, se reemplaza el valor de la altura óptima, para encontrar el valor óptimo del diámetro, obteniendo como resultado

$$h = 72.5\ cm \quad (7a)$$
$$d = 72.5\ cm \quad (7b)$$
$$s = 24808\ cm^2 \quad (7c)$$

La Figura 2 muestra la curva del valor de la superficie y su valor óptimo.

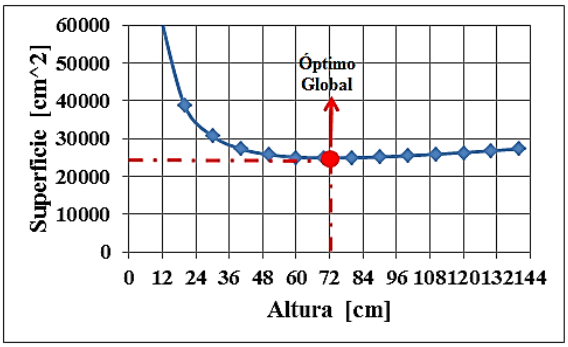


Figura 2. Valor optimo global para la superficie.

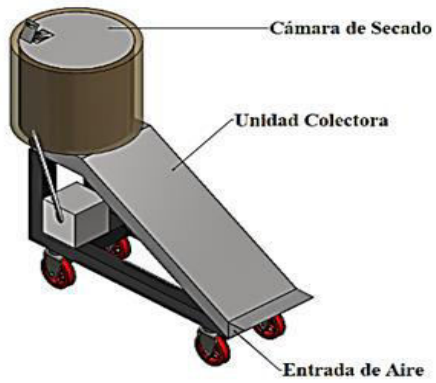


Figura 3. Propuesta de diseño del secador.

2.3 Análisis térmico del flujo de aire en la cámara de secado

En el análisis por elementos finitos no se abordan todas las variables que influyen en el secado de la fruta y en el diseño del secador. En cambio, el secador se analiza de una forma idealizada donde se controlan las variables de mayor importancia (temperatura y velocidad del aire).

De acuerdo a parámetros utilizados en simulaciones de termo-fluidos para secadores con forma de paralelepípedos, con entrada de aire de 1 m/s y condiciones ambientales idealizadas (Diana Carolina Rueda Martín, 2017), se realiza un modelo CAD del diseño estructural del secador. Con esto se determina el volumen interno de la cámara con un mallado con topología 3D. La Figura 3 muestra el modelo CAD del secador para ser analizado por el método de elemento finito.
Para discretizar el volumen del flujo del aire de la cámara interna se genera una malla de tipo 3D tetraédrica de 4 nodos, en la cual se obtiene un número total de elementos de malla de 1,674,846 (ver Figura 4).

Para las restricciones del modelo numérico, se considera que el cuerpo negro del panel solar está a una temperatura constante de 100 °C. Adicionalmente, se considera una temperatura en las paredes internas de la cámara de secado de 40 ° C y unas condiciones de borde en la velocidad del fluido de 1 m/s en la entrada del secador y una salida de aire a presión atmosférica. La Figura 5 muestra las condiciones de borde del volumen del aire en la cámara de secado.

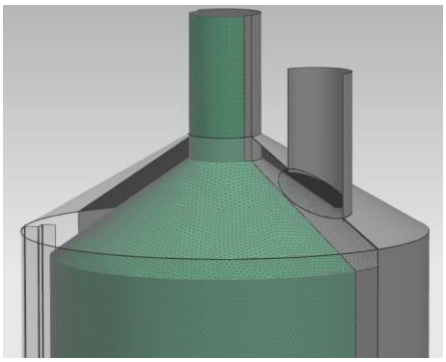


Figura 4. Mallado del Volumen del aire en la cámara de secado.

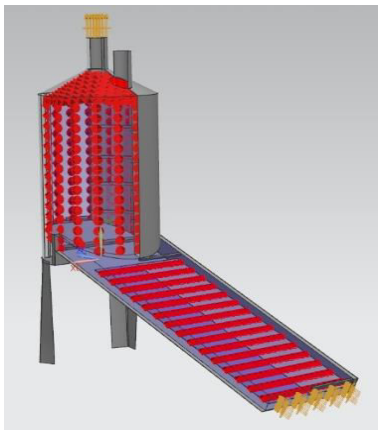


Figura 5. Condiciones de borde del volumen del aire en la cámara de secado.

2.4 Análisis de resultados del flujo de aire en la cámara de secado

Realizando la simulación térmica y de flujo de fluido, y estableciendo consideraciones ideales en el sistema, se soluciona el modelo en un estado estacionario, con un tipo de solución de flujo térmico acoplado, y control de convergencia de 50 iteraciones. Con esto se obtienen los resultados de velocidad y temperatura del fluido. Como resultado, se estima en la cámara una temperatura alrededor de los 45°C, mientras que las condiciones de 100 °C se obtienen en el cuerpo negro por efectos de la radiación solar (ver Figura 6).

Adicionalmente se observa que independiente de la temperatura, los efectos de la velocidad del flujo están dadas por la forma y altura del diseño del equipo, estas variaciones de velocidad tienen un comportamiento distinto en las condiciones de secado, que mediante un análisis experimental se puede validar la mejor forma de mantener un flujo laminar o turbulento (ver Figura 7).

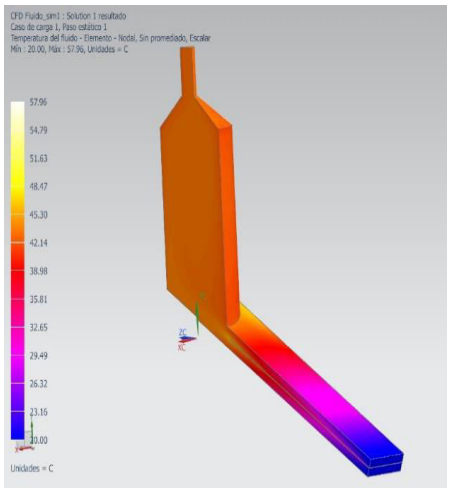


Figura 6. Distribución de la temperatura en el secador.

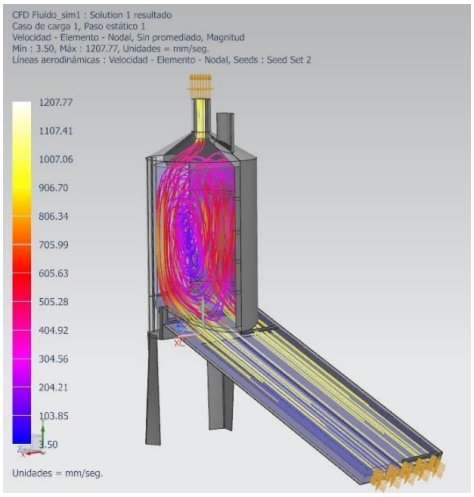


Figura 7. Velocidad del flujo de aire en el secador.

4. CONCLUSIONES

1. Se diseñó y se modeló en un software CFD un secador de manzanas para ser utilizado en el Municipio de Nuevo Colón, Boyacá, Colombia.
2. Se logró reducir la cantidad de material, gracias a la optimización aplicada en la cámara de secado, reduciendo así el costo de fabricación del dispositivo y mejorando la producción final.
3. Se comprobó que la metodología de optimización fue acertada, en el resultado obtenido.
4. La distribución de la temperatura en la cámara de secado es homogénea, lo cual es importante mantener para un buen secado de la manzana.
5. El flujo del aire se torna turbulento en algunas zonas de la cámara, generando unas zonas donde secara más que otras las manzanas, de esta forma se corrigió redirigiendo el flujo de aire en la salida del colector solar, haciendo que el aire entre de forma laminar a la cámara de secado.

RECONOCIMIENTO

S. Cano-Andrade agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), México, por el apoyo otorgado mediante el programa S.N.I.

REFERENCIAS

Almada, F. C. (2005). Guia de uso de secadores solares para frutas. *UNESCO-Montevideo*.

Diana Carolina Rueda Martín, J. X. (2017). Simulación del Compaortamiento Térmico y Fuido-Dinámico de un Secador Hibrido Solar-Biomasa. *VIII Congraso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*.

Mahecha, P. V. (2011). Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de secador dinámico para la obtención de pulpas de frutas deshidratadas laminadas. *Ingeniería e Investigación Vol. 31* .

Pedro Julián García, J. L. (2017). Modelado Numérico del Proceso de Secado Solar de Manzanas en el Municipio de Nuevo Colon Boyacá. *Revista UIS Ingenierías*.

Puertas, I. M. (2005). *Modelado y Construcción de un Secador Solar Híbrido para Residuos Biomásicos* . Badajoz: Universidad de Extremadura .

Sosa, A. (20 de 09 de 2018). *Turismo Rural Nuevo Colón Boyacá*. Obtenido de http://infoturismonuevocolon.blogspot.com/

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL TQ PLINT TE94 QUE FUNCIONA COMO ENFRIADOR DE AIRE Y BOMBA DE CALOR

EXPERIMENTAL SYSTEM TQ PLINT TE94 ENERGY ANALYSIS THAT WORKS AS AN AIR COOLER AND HEAT PUMP

Eng. Emanuel López Alba*, MSc. Edgar Vicente Torres González*, PhD. Helen D. Lugo Méndez, MSc. Sergio Castro Hernández*, MSc. Israel Eliú Hernández Mora*, MSc. Alejandro Torres Aldaco*, PhD. Raúl Lugo Leyte*.**

*Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Av. San Rafael Atlixco No. 186, Colonia Vicentina, 09340, Iztapalapa, CDMX, México. 00-52-55-58044600-Ext:2853.
ela@xanum.uam.mx, etorres@xanum.uam.mx, Sch@xanum.uam.mx, iehm@xanum.uam.mx, ata@xanum.uam.mx, lulr@xanum.uam.mx.

**Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, Departamento de Procesos y Tecnología, Av. Vasco de Quiroga No. 4871, Colonia Santa Fé, 05348, Cuajimalpa, CDMX, México. 00-52-55-58044600-Ext:2853.
hlugo@correo.cua.uam.mx

Resumen: El desempeño de las bombas de calor y enfriadores de aire está relacionado con la eficiencia y el consumo de energía. Es importante estudiarlos con el fin de determinar su mejor coeficiente de operación. En este trabajo se realiza un análisis energético al enfriador de aire/bomba de calor experimental TQ PLINT TE94 con R22, en el cual, se varió el flujo de agua en 2, 4, 6 y 8 L/min. Para la bomba de calor, el COP bajo se debe al aumento de la diferencia de temperaturas entre el refrigerante y los fluidos externos (agua y aire); sin embargo, estas pérdidas son inevitables, además, los mayores COP's se obtuvieron para el flujo de agua de 8 L/min con una potencia del compresor de 917 W. Para un flujo de agua de 4 L/min en el enfriador, se suministra al compresor la menor potencia y se obtuvo los mayores COP's reales.

Palabras clave: Bomba de calor, Coeficiente de Operación, Enfriador de Aire, Refrigerante

Abstract:
The performance of heat pumps and air coolers is related to efficiency and energy consumption. It is important to study them in order to determine their best coefficient of performance. In this paper, an energy analysis was performed on the experimental air cooler/heat pump TQ PLINT TE94 with R22, in which the water flow was varied by 2, 4, 6 and 8 L/min. For the heat pump, the low COP is due to the increase in the temperature difference between the refrigerant and the external fluids (water and air); however, these losses are unavoidable, in addition, the highest COP's were obtained for the water flow of 8 L/min with a compressor power of 917 W. For a water flow of 4 L/min in the cooler, it is supplied to the compressor the lowest power and the highest real COP's were obtained.

Keywords: Heat pump, Coefficient of Performance, Air Cooler, Refrigerant.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales aplicaciones de las bombas de calor por compresión de vapor es proporcionar calefacción y enfriamiento a un determinado espacio. El espacio puede ser pequeño, como dentro de un vehículo, hasta uno de mayor tamaño en donde el calor se transfiere de un cuarto a otro. La tecnología de las bombas de calor para calefacción/enfriamiento no es nueva, sin embrago todavía se desarrollan nuevas aplicaciones; por ejemplo, la calefacción y el enfriamiento, así como la provisión de agua caliente a una casa se pueden llevar a cabo simultáneamente (Chua *et al.*, 2010). Con relación a su función y necesidades operativas, las bombas de calor pueden calentar y enfriar casas o edificios y se pueden dividir en cuatro categorías: (1) bombas de calor sólo para calefacción, que proveen calefacción y/o calentamiento de agua; (2) bombas de calor para calefacción y enfriamiento, que dan tanto calefacción como enfriamiento; (3) sistemas integrados de bomba de calor, que entregan calefacción, enfriamiento, calentamiento de agua y, a veces, recuperación de calor del aire de escape; y (4) calentadores de agua con bomba de calor, totalmente dedicados al calentamiento de agua (Saloux *et al.*, 2018). El desempeño de las bombas de calor se ve afectado por las propiedades físicas y térmicas de la fuente o sumidero de calor, así como del tipo de refrigerante utilizado. Además, el desempeño de los componentes tiene un papel importante en el coeficiente de operación de las bombas de calor. Existen muchos estudios e investigaciones que se centran en el desempeño y las condiciones de operación de los componentes de las bombas de calor, pero la mayoría se centra en el desempeño de un componente de la bomba de calor y sus efectos en el coeficiente de operación, o sea, investigan la interacción entre los componentes y todo el sistema de bomba de calor (Felten *et al.*, 2018; Çakır y Çomaklı, 2016.). En este trabajo se realiza un análisis energético al equipo experimental que funciona como bomba de calor y enfriador de aire, TQ-Plint TE94, y se investigan los efectos que ocasiona el variar el flujo de agua suministrada.

2. METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo, se utilizó el sistema TQ PLINT TE94 que consta de dos unidades separadas, el acondicionador de aire y la consola de control. Las dos unidades están conectadas por tuberías de agua. El acondicionador de aire es completamente autónomo, y se compone de un sistema de refrigeración, un intercambiador de calor de aire y un intercambiador de agua, que se utiliza como fuente o sumidero según sea el funcionamiento (condensador o evaporador); un compresor; una válvula de flujo reversible, un ventilador, un colector de condensado, un manómetro inclinado y un tubo Pitot-estático para medir el flujo de aire y un calentador de inmersión, como se muestran en las Figuras 1 y 2.

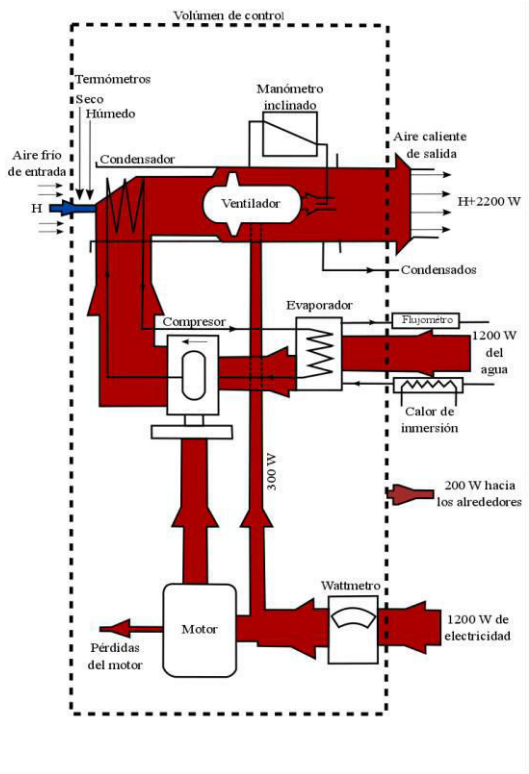


Fig. 1. Arreglo experimental de la Bomba de calor.

Los instrumentos de medición contenidos en el panel de control son: un medidor de potencia para registrar la entrada de energía eléctrica al compresor y ventilador; un indicador de temperatura; un higrómetro para medir la humedad relativa del aire que entra y sale del sistema; un caudalímetro de agua; un vaso colector graduado para el condensado; y termopares tipo k. El aire a acondicionar circula perpendicularmente en el intercambiador de calor de refrigerante R22, succionado por un ventilador, y finalmente el flujo de aire se descarga a un conducto circular.

En este trabajo para determinar el desempeño del equipo se realizó un analisis energético en el cual se varió el flujo de agua en 2, 4, 6, 8 L/min. La experimentación se realizó en la CDMX a las 9:00 horas, las condiciones ambiéntales son: Temperatura de (16-19) °C, Humedad relativa del (60-85) %, presión atmosférica de 77998 Pa.

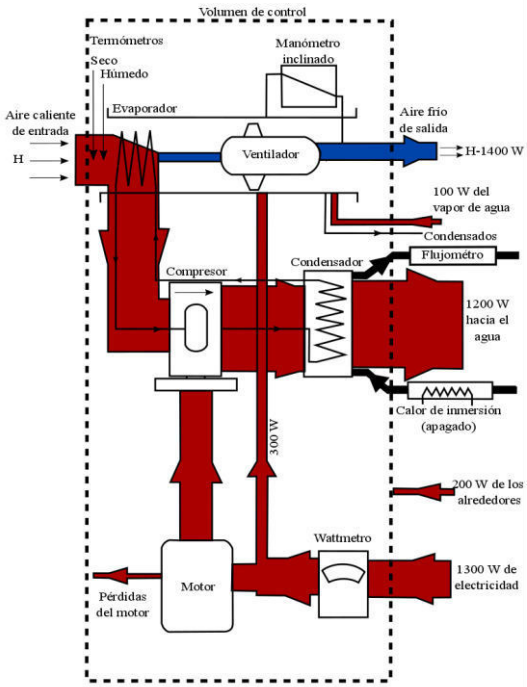


Fig. 2. Arreglo experimental del Enfriador de aire.

Cuando el equipo actúa como enfriador, la dirección del flujo ahora se invierte, el refrigerante pasa del compresor al intercambiador de calor de refrigerante a agua, es decir, pasa al condensador, en donde el refrigerante cede calor al agua, y enseguida pasa a través de la válvula de estrangulamiento, en donde disminuye su presión y temperatura; finalmente el refrigerante pasa a través del evaporador extrayendo el calor del aire y regresando al compresor. En este caso, el aire algunas veces se enfriará por debajo del punto de rocío y se depositará el condensado en el vaso colector graduado, en la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del enfriador de aire. Los datos técnicos para el aire acondicionado de alto nivel Versatemp tipo vH250 son; Rango de Voltaje 220-240; Corriente como Bomba de calor 5.5; Corriente como enfriador 5.4; Potencia suministrada máxima 1.37 kW; Potencia suministrada al calentador de inmersión 2 kW; Flujo de agua de enfriamiento máximo 5 L/min nominal; Flujo volumétrico de aire nominal 9 m^3/min; Capacidad nominal de calefacción/enfriamiento de 1.8 a 3.5 kW.*2.2.* Por lo general, el acondicionador de aire se describe como un enfriador cuando extrae calor del aire circundante y lo rechaza al agua, y como una bomba de calor cuando transfiere calor en la dirección inversa, del agua al aire. Sin embargo, en ambos casos funciona como una máquina térmica invertida o una bomba de calor, ya que el efecto final es transferir calor de un depósito a otro, normalmente a una temperatura más alta, mediante el consumo de trabajo mecánico. El modelo teórico con el que se compara este dispositivo para evaluar su eficiencia, es la máquina reversible de Carnot. En la Máquina de Carnot se suministra calor $\dot{Q}_H$ desde una fuente que está a una temperatura alta T_H a una máquina térmica, ésta produce un Potencia $\dot{W}$, y rechaza un flujo de calor $\dot{Q}_L$ a un depósito que está a menor temperatura T_L. En el Ciclo de Carnot todos los procesos son reversibles, entonces el ciclo se puede invertir y la máquina absorbería calor de la fuente fría y cedería calor a la fuente caliente, teniendo que suministrar trabajo a la máquina. Si el objetivo de esta máquina es extraer calor de la fuente fría (para mantenerla fría) se denomina máquina frigorífica, y si es ceder calor a la fuente caliente, bomba de calor. Dicho motor absorbe calor desde una fuente a temperatura T_H, y lo rechaza a un depósito a una temperatura menor T_L, los procesos intermedios son isoentrópicos en el cual, $T_H > T_L$. El coeficiente de operación, *COP,* de una bomba de calor real, se expresa como:

$$COP_H = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} \tag{1}$$

y cuando opera como un enfriador:

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} \tag{2}$$

El coeficiente de operación, $(COP)_{max}$, de una bomba de calor ideal, es:

$$\left(COP_H\right)_{\max} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \tag{3}$$

y el de un enfriador

$$\left(COP_R\right)_{\max} = \frac{T_L}{T_L - T_H} \tag{4}$$

También se tiene que para todos los casos

$$COP_H = COP_R + 1 \tag{5}$$

Estas expresiones indican que, a medida que se reduce el tirante térmico entre la fuente fría y el sumidero caliente, el coeficiente de operación debería aumentar; una potencia determinada permite la transferencia de un flujo de calor desde la temperatura más baja a la más alta. En un sistema real, como el que se estudia en este trabajo, el coeficiente de operación es menor al ideal por las pérdidas eléctricas y mecánicas en el motor y compresor, la irreversibilidad del ciclo de enfriamiento en sí; la necesidad de diferencias de temperaturas entre el refrigerante y el aire, y entre el refrigerante y el agua, y como resultado el ciclo del refrigerante opera entre límites de temperaturas más amplios que los aplicables al agua y al aire que forman la fuente y el sumidero; y las pérdidas eléctricas y mecánicas en el ventilador. En la Figura 3, se muestran los diversos flujos de energía a través del sistema.

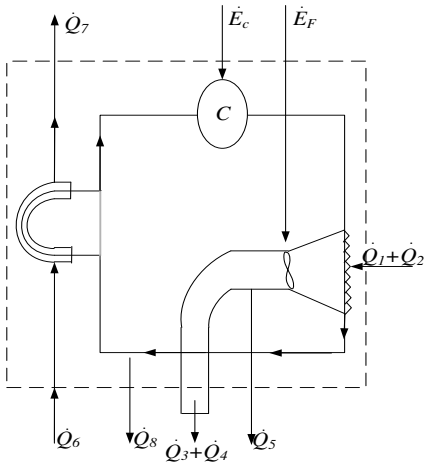


Fig. 3. Balance de energía en el sistema.

A continuación, se muestra las expresiones para determinar los flujos de calor:

-Entalpía del aire seco a la entrada del acondicionador

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 c_P T_1 \tag{6}$$

-El flujo másico de aire, $\dot{m}_1$ se expresa como:

$$\dot{m}_1 = 0.00105\sqrt{\frac{H_1 P_a}{T_2}} \tag{7}$$

-Entalpía del vapor de agua a la entrada del acondicionador

$$\dot{Q}_2 = \omega \dot{m}_1 h_v \tag{8}$$

-Entalpía del aire seco a la salida del acondicionador

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_1 c_p T_2 \tag{9}$$

-Entalpía del vapor de agua a la salida del acondicionador

$$\dot{Q}_4 = h_v\left(\omega \dot{m}_1 - \dot{m}_2\right) \tag{10}$$

-Entalpía del condensado

$$\dot{Q}_5 = \dot{m}_2 h_w \tag{11}$$

-Entalpía del agua circulante en la entrada

$$\dot{Q}_6 = \dot{m}_3 c_{P,w} T_3 \tag{12}$$

-Entalpía del agua circulante a la salida

$$\dot{Q}_7 = \dot{m}_3 c_{P,w} T_4 \tag{13}$$

-Pérdidas

$$\dot{Q}_8$$

-Entrada de potencia eléctrica al ventilador.

$$\dot{E}_F$$

La ecuación de flujo de energía para el sistema se puede escribir como sigue:

$$\left(\dot{Q}_6 - \dot{Q}_7\right) + \left(\dot{E}_c - \dot{E}_F\right) = \left(\dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5\right) - \left(\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2\right) + \dot{Q}_8 \tag{14}$$

El primer término representa el calor suministrado al sistema desde el agua en circulación, y el segundo representa la entrada de energía eléctrica. La suma algebraica de estos términos se equipará con el aumento de flujo de calor del aire y el vapor de agua que pasa por el sistema, junto con las pérdidas. Como se muestra en la Figura 3. La ecuación se aplica por igual, con los cambios de señal apropiados, cuando la máquina está funcionando como enfriador. Cuando se opera como una bomba de calor, el coeficiente de operación se puede definir de dos maneras diferentes. El coeficiente de operación total externo es:

$$\left(COP_H\right)_E = \frac{\left(\dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5\right) - \left(\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2\right)}{\left(\dot{E}_c + \dot{E}_F\right)} \tag{15}$$

El coeficiente de operación correspondiente para una bomba ideal que opera entre las mismas temperaturas medias es:

$$(COP_H)_{\max} = \frac{\frac{1}{2}(T_1+T_2)}{\frac{1}{2}(T_1+T_2)-\frac{1}{2}(T_3+T_4)} \quad (16)$$

El coeficiente de operación de la bomba de calor básica no es idéntico al coeficiente de operación general, ya que la potencia suministrada al ventilador no interviene en el ciclo del refrigerante y la del compresor sí. Esto conduce a un coeficiente de operación interno:

$$(COP_H)_I = \frac{(\dot{Q}_3+\dot{Q}_4+\dot{Q}_5)-\dot{E}_F-(\dot{Q}_1+\dot{Q}_2)}{(\dot{E}_c)} \quad (17)$$

Esto se puede comparar con un coeficiente de operación ideal basado en la diferencia de temperatura a través del circuito de la bomba de calor:

$$(COP_H)_I = \frac{T_{10}}{T_{10}-T_8} \quad (18)$$

De manera similar, se pueden reconocer dos criterios diferentes cuando el sistema está funcionando como enfriador:

$$(COP_R)_E = \frac{(\dot{Q}_1+\dot{Q}_2)-(\dot{Q}_3+\dot{Q}_4+\dot{Q}_5)}{(\dot{E}_c+\dot{E}_F)} \quad (19)$$

en comparación con el ideal

$$(COP_R)_{\max} = \frac{\frac{1}{2}(T_1+T_2)}{\frac{1}{2}(T_3+T_4)-\frac{1}{2}(T_1+T_2)} \quad (20)$$

y

$$(COP_R)_I = \frac{(\dot{Q}_1+\dot{Q}_2)+\dot{E}_F-(\dot{Q}_3+\dot{Q}_4+\dot{Q}_5)}{\dot{E}_c} \quad (21)$$

en comparación con el ideal

$$(COP_R)_{\max} = \frac{T_{10}}{T_8-T_{10}} \quad (22)$$

En el caso del enfriador, T_8 es la temperatura a la salida del intercambiador refrigerante-agua, y T_{10} es la temperatura de entrada del intercambiador refrigerante-aire.

La humedad específica del aire que ingresa al acondicionador está relacionada con la humedad relativa ϕ medida por el higrómetro digital:

$$\omega = 0.622\left(\frac{\phi P_{sat}}{P_a-\phi P_{sat}}\right) \quad (23)$$

donde, P_{sat} y P_a son la presión de saturación y la presión atmosférica a la temperatura de entrada del aire en el acondicionador.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para evaluación del sistema TQ PLINT TE94, enfriador de aire y bomba de calor, se realizan variaciones del flujo volumétrico de agua en el intercambiador de calor, del agua de enfriamiento con el refrigerante R22. Los datos obtenidos para el enfriador de aire y bomba de calor se resumen en las Tabla 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Pruebas en el enfriador de aire.

	Flujos de agua en el intercambiador			
	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min
T_1 (°C)	19	17	17	16
T_2 (°C)	14	13	13	13
T_3 (°C)	26	30	31	32
T_4 (°C)	48	39	37	37
T_5 (°C)	2	1	1	0
T_6 (°C)	70	66	65	66
T_7 (°C)	70	66	65	66
T_8 (°C)	36	32	32	32
T_9 (°C)	2	1	0	0
T_{10} (°C)	3	2	1	1
$\dot{E}_c$ (W)	683	680	685	701
$\dot{E}_f$ (W)	447	430	385	359
P_a (Pa)	77,998	77,998	77,998	77,998
ϕ_{ent} (%)	67	89	86	83
ϕ_{sal} (%)	54	80	67	66
m_2 (kg/s)	0.00029	0.00083	0.00045	0.00056

Tabla 2. Pruebas en la bomba de calor.

	Flujos de agua en el intercambiador			
	2 L/min	4 L/min	6 L/min	8 L/min
T_1 (°C)	25	27	28	28
T_2 (°C)	45	48	50	51
T_3 (°C)	18	16	16	15
T_4 (°C)	7	11	12	12
T_5 (°C)	73	86	89	91
T_6 (°C)	2	6	7	8
T_7 (°C)	2	6	7	8
T_8 (°C)	11	14	15	16
T_9 (°C)	73	86	89	91
T_{10} (°C)	42	50	51	52
$\dot{E}_c$ (W)	877	950	941	917
$\dot{E}_f$ (W)	363	370	409	453
P_a (Pa)	77,998	77,998	77,998	77,998
ϕ_{ent} (%)	35	25	34	41
ϕ_{sal} (%)	11	10	10	10

La Figura 4 muestra el diagrama presión – entalpía del enfriador de aire en el circuito del refrigerante R22, para un flujo volumétrico de agua de 2 L/min

y 6 L/min. El efecto de enfriamiento, h_1-h_4, es mayor para un flujo de 6 L/min, el aumento del flujo de agua de 2 L/min a 6 L/min ocasiona un incremento del 2.97 % en el efecto de enfriamiento. Mientras que, el trabajo suministrado en el compresor, h_2-h_1, disminuye con el flujo volumétrico de agua de 6 L/min, de tal manera que, cuando el flujo de agua se incrementa de 2 L/min a 6 L/min, se tiene una disminución del 5.68 % en el trabajo del compresor. Entonces, con relación al efecto de enfriamiento y el trabajo de compresión, el coeficiente de operación del circuito refrigerante es mayor cuando el flujo de agua es 6 L/min.

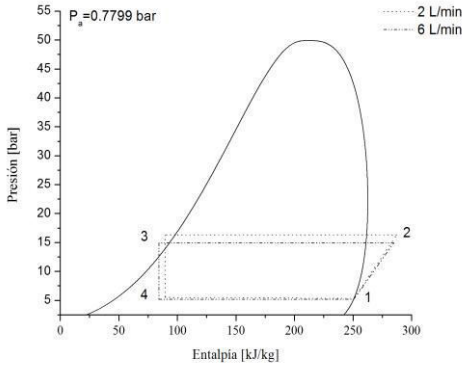


Fig. 4. Diagrama Presión-Entalpía del enfriador de aire, a diferentes flujos volumétricos de agua.

La Figura 5 muestra el diagrama Presión – Entalpía de la bomba de calor en el ciclo del refrigerante R22, para un flujo volumétrico de agua de 2 L/min y 6 L/min. El efecto de calentamiento, h_2-h_3, es mayor en un flujo de 2 L/min, es decir, para un incremento en el flujo volumétrico del agua desde 2 L/min a 6 L/min, el efecto de calentamiento tiene una disminución del 2.64 %. Además, el trabajo suministrado en el compresor, h_2-h_1, es menor con el flujo volumétrico de agua de 2 L/min, de tal manera que, un incremento del flujo de 2 L/min a 6 L/min causa un aumento del 14.11 % en el trabajo del compresor. Entonces, con relación al efecto de calentamiento y el trabajo de compresión, el mayor coeficiente de operación del circuito refrigerante se encuentra a un flujo de agua de 2 L/min.

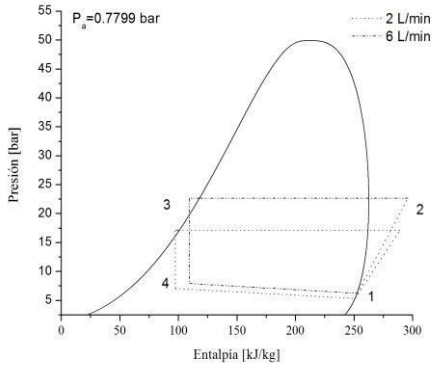


Fig. 5. Diagrama Presión-Entalpía de la bomba de calor, para diferentes flujos volumétricos de agua.

La Figura 6 muestra el comportamiento de las potencias suministradas al enfriador de aire en función del flujo volumétrico del agua. Si el flujo de agua aumenta de 2 L/min a 8 L/min, la potencia total suministrada al enfriador de aire presenta una disminución del 6.19 %, debido a la potencia del ventilador que tiene una disminución del 19.68 %, a pesar que la potencia del compresor aumenta 2.63 %. Además, los comportamientos de la potencia del compresor y el flujo másico del refrigerante son semejantes, de tal manera que, la menor potencia del compresor es para un flujo de agua de 4 L/min, con 680 W, debido a que también tiene el menor flujo másico de refrigerante con 12.49 kg/s.

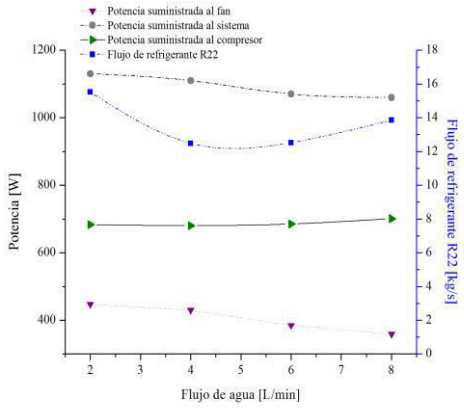


Fig. 6. Potencias suministradas al enfriador de aire en función del flujo volumétrico de agua.

La Figura 7 muestra el comportamiento de las potencias suministradas a la bomba de calor con relación al flujo volumétrico del agua. Cuando el flujo volumétrico aumenta de 2 L/min a 8 L/min, la

potencia total suministrada a la bomba de calor tiene un incremento del 10.48 %, debido a que la potencia del ventilador presenta un incremento del 24.79 %; sin embargo, para el rango de 4 L/min a 8 L/min, se tiene una disminución del 3.47 % en la potencia del compresor. Además, el comportamiento de la potencia del compresor es contrario a la del flujo másico de refrigerante, es decir, cuando la potencia del compresor aumenta, el flujo de refrigerante disminuye y viceversa. Entonces, la menor potencia del compresor se encuentra en el flujo de agua de 2 L/min, con 877 W, debido al menor trabajo de compresión con 38.04 kJ/kg (como muestra la Figura 6), a pesar que el flujo de refrigerante a esa condición no sea el menor.

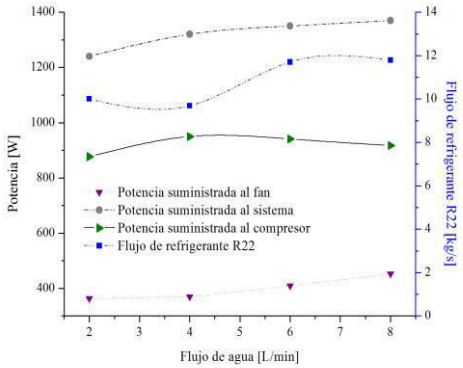


Fig. 7. Potencias suministradas a la bomba de calor en función del flujo volumétrico de agua.

La Figura 8 muestra los diferentes coeficientes de operación del enfriador de aire para el rango estudiado del flujo volumétrico de agua, de 2 a 8 L/min. Los coeficientes de operación internos son mayores a los coeficientes de operación externos, ya que los coeficientes de operación externos consideran la potencia del ventilador, sin embargo, para los COP's reales (interno y externo), el comportamiento es similar, es decir, sus curvas de comportamiento son casi paralelas. Además, se tiene que los coeficientes de operación ideal interno, real interno y real externo presentan los mayores valores en un flujo volumétrico de agua de 4 L/min, con 9.17, 4.35 y 2.28 respectivamente, esta situación se debe a que son menores la potencia suministrada en el compresor y del flujo másico de refrigerante. Mientras que el mayor coeficiente de operación ideal externo se encuentra en un flujo de 6 L/min, con un valor de 15.16.

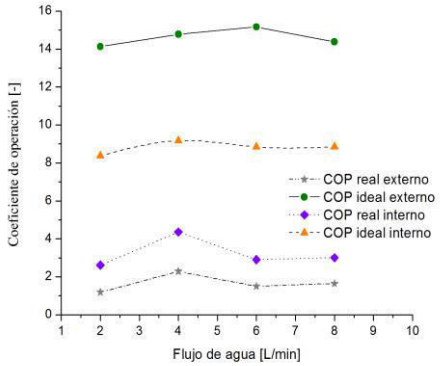


Fig. 8. Coeficientes de operación del enfriador de aire en función del flujo volumétrico del agua.

La Figura 9 muestra los diferentes coeficientes de operación de la bomba de calor con respecto al flujo volumétrico de agua. Al igual que el enfriador de aire, los coeficientes de operación externos son menores a los coeficientes de operación internos, así como los COP's reales (interno y externo) tienen comportamientos similares y se encuentran muy cercanos, por ejemplo, para un flujo de agua de 6 L/min, la diferencia entre el COP interno y COP externo es de 0.3. Además, los mayores COP´s reales (interno y externo) se encuentran a un flujo volumétrico de 8 L/min, con 2.10 y 1.73 respectivamente. Por otra parte, para un flujo de 4 L/min, el COP ideal externo es 87.2 % mayor que el COP real externo; el COP ideal interno es 78.7% mayor que el COP real interno; y el COP real interno es 13.36 % mayor con respecto al COP real externo.

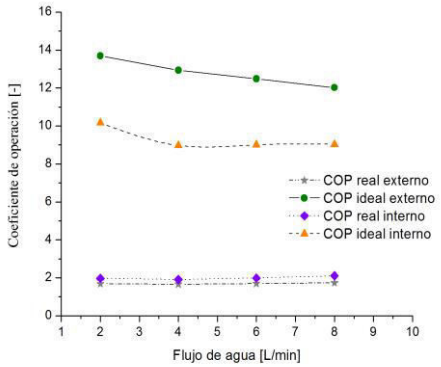


Fig. 9. Coeficientes de operación de la bomba de calor en función del flujo volumétrico del agua.

4. CONCLUSIONES

Los coeficientes de operación externos son menores a los coeficientes de operación internos, debido a que los primeros consideran a la potencia del ventilador junto con la potencia del compresor como entradas requeridas, para ambos casos. Además, los COP's reales (interno y externo) tienen comportamientos similares. Para el enfriador de aire, la potencia suministrada al compresor tiene el mismo comportamiento que el flujo másico del refrigerante, Además, la menor potencia del compresor se encuentra en el flujo volumétrico de agua de 4 L/min, con 680 W, debido a que también tiene el menor flujo másico de refrigerante con 12.49 kg/s, y por ende, se tienen los mayores coeficientes de operación reales en el enfriador de aire. Para la bomba de calor, la potencia suministrada al compresor tiene un comportamiento contrario al flujo másico de refrigerante, es decir, si la potencia del compresor se incrementa, el flujo de refrigerante disminuye y viceversa. Además, la menor potencia del compresor se tiene en el flujo de agua de 2 L/min, con 877W, debido al menor trabajo de compresión con 38.04 kJ/kg, a pesar que el flujo de refrigerante a esa condición no sea el menor, en consecuencia, se tienen los mayores coeficientes de operación reales en la bomba de calor.

REFERENCIAS

Chua, K. J.; Chou, S. K.; Yang, W. M. (2010). *Advances in heat pump systems: A review*. Applied Energy, **Vol. 87**, pp. 3611-3624.

Saloux, E.; Sorin, M.; Teyssedou, A. (2018). *Assessing the exergy performance of heat pump systems without using refrigerant thermodynamic properties*. International Journal of Refrigeration, **Vol. 98**, pp. 1-9.

Felten, B.; Weber, C. (2018). *The value(s) of flexible heat pumps–Assessment of technical and economic Conditions*. Applied Energy, **Vol. 228**, pp. 1292-1319.

Çakır, U.; Çomaklı, K. (2016). *Exergetic interrelation between and heat pump and components*. Applied Thermal Engineering, **Vol. 105**, pp. 659–668.

Nomenclatura

Pa presión atmosférica, N / m^2

Temperaturas

T_1 temperatura de aire en la entrada; [K],

T_2 temperatura de aire en la descarga; [K],

T_3 temperatura de circulación de agua en la entrada; [K],

T_4 temperatura de circulación de agua en la descarga; [K],

Bomba de calor / Enfriador

T_5.....compresor; [K], Descarga / Entrada

T_6.....compresor; [K], Entrada / Descarga

T_7 del refrigerante en el intercambiador de calor con agua; [K], Entrada / Descarga

T_8 del refrigerante en el intercambiador de calor con agua; [K] Entrada / Descarga

T_9 del intercambiador de calor con refrigerante con aire; [K] Entrada / Descarga

T_{10} del intercambiador de calor con refrigerante con aire; [K] Descarga / Entrada

Flujos másicos

$\dot{m}_1$ aire seco, kg / s

$\dot{m}_2$ descarga de condensado, kg / s

$\dot{m}_3$ circulación de agua, kg / s

Cantidades térmicas

$c_{P,\,w}$ calor específico del agua, J / kg°C

c_P calor específico del aire a presión constante, J / kg°C

h_v entalpía específica de vapor de agua, J / kg

H_w entalpía específica de condensado, J / kg

SECADO DE NUEZ DE LA INDIA CULTIVADA EN CAMPECHE, MÉXICO MEDIANTE TECNOLOGÍAS SOLARES DIRECTAS Y BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

NUT DRYING OF INDIA CULTIVATED IN CAMPECHE, MEXICO THROUGH DIRECT SOLAR TECHNOLOGIES AND UNDER CONTROLLED CONDITIONS

Margarita Castillo Téllez*, Juan Carlos Ovando Sierra, Francisco Lezama Zárraga, Diana C. Mex Álvarez
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche.
Universidad Autónoma de Campeche Camus V, Unidad Habitacional Siglo XXIII por Avenida Ing. Humberto Lanz Cárdenas, Kalé, 24085 Campeche, Camp. Tel. 01 981 811 9800.
https://fi.uacam.mx/

mcastill@uacam.mx, jcovando@uacam.mx, frlezama@uacam.mx, diancmex@uacam.mx

Resumen: Las semillas de nuez de la India han sido usadas durante cientos de años en américa del sur gracias a sus múltiples propiedades beneficiosas y medicinales que posee. En este trabajo se presentan las características de la deshidratación de las semillas de nuez de la India utilizando un horno no convectivo a condiciones controladas de temperatura: 55 °C y 65 °C, con tiempos de secado de 1280 y 1080 minutos, respectivamente. Se utilizó además un secador solar directo tipo gabinete sin ventilación y secado a cielo abierto, obteniendo tiempos de secado promedios de 1020 y 1400 minutos, respectivamente. La temperatura en la cámara de secado más alta medida fue de 58.8 °C.
Las pruebas se realizaron en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de Campeche, en Campeche, México, ubicada a 19º51'00" de latitud norte, y 90º31'59" de longitud oeste, con un clima cálido-húmedo y valores promedio máximos de irradiancia solar de 970 W/m^2. La humedad final de la nuez seca se osciló entre 6 % y 4 %. El tiempo de secado en gabinete fue más corto debido a que en convección natural se pueden alcanzar temperaturas más altas o muy cercanas a los 55 °C.
Los resultados obtenidos muestran que el secado solar en gabinete es una tecnología simple y económica; se comprobó también la factibilidad técnica del secado solar de la semilla de marañón, obteniendo un valor agregado y alentando su producción en México.

Palabras clave: Secador solar directo, Secado con temperaturas controladas, Convección natural, Cinética de secado.

Abstract: The nuts of India have been used for hundreds of years in South America thanks to its many beneficial and medicinal properties. This paper presents the characteristics of the dehydration of the nuts of India using a non-convective oven at controlled temperature conditions: 55 °C and 65 °C, with drying times of 1280 and 1080 minutes, respectively. A direct solar dryer type cabinet without ventilation and open-air drying was also used, obtaining average drying times of 1020 and 1400 minutes, respectively. The temperature in the measured drying chamber was 58.8 °C.

The tests were carried out in the Facultad de Ingeniería of the Universidad Autónoma de Campeche, in Campeche, México, located at 19º51'00" north latitude, and 90º31'59" west longitude, with a warm-humid climate and average values maximum solar irradiance of 970 W/m^2. The final humidity of the dried walnut ranged between 6 % and 4 %. The drying time in the cabinet was shorter due to the fact that natural convection can reach higher temperatures or very close to 55 °C.
The results obtained show that solar drying in the cabinet is a simple and economical technology; The technical feasibility of the solar drying of the cashew nut was also verified, obtaining an added value and encouraging its production in Mexico.

Keywords: Direct solar dryer, Drying with controlled temperatures, Natural convection Drying kinetics

1. INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía y el impacto ambiental, son dos elementos sustantivos en cualquier proceso de sustentabilidad y deben de estar considerados en cualquier propuesta de desarrollo económico, social y cultural. El agotamiento de los recursos petrolíferos, así como su impacto ambiental, han direccionado el interés hacia nuevas alternativas energéticas basadas en las energías renovables. México cuenta con una amplia gama de ofertas de energías renovables, principalmente de origen solar, geotérmico, biológico, eólico e hidráulico, distribuidas en diferentes regiones del país, siendo la solar, la de mayor distribución, lo que permite una mayor utilización, tanto en su conversión térmica como eléctrica (SENER-Gobierno del Estado de Campeche).

El árbol de marañón produce un fruto del cual se extrae la semilla denominada nuez de la india. Este árbol prospera en Yucatán, Campeche, Chiapas, Oaxaca y Veracruz, estos Estados son grandes importadores de esta nuez, la cual podría representar una importante contribución a la economía estatal con su adecuada deshidratación, debido a las múltiples propiedades beneficiosas y medicinales que posee (Conacyt-Gobierno del Estado de Campeche).

El pseudo fruto conocido como fruto del marañón se forma del pedúnculo o receptáculo, éste es engrosado y jugoso, de color amarillo o rojo, en el extremo se ubica el fruto verdadero, una nuez en forma de riñón, gris y dura, conocida como nuez de marañón. El pedúnculo, que es la parte utilizable como fruta fresca, es un cuerpo en forma de pera o esférico, de 4 a 8 cm de largo, amarillo o rojo. El parénquima de color amarillo, contiene un líquido azucarado y astringente además de que es rico en vitamina C. La nuez, de 2 a 3 cm de largo, tiene un pericarpio liso y brillante y el mesocarpio tiene espacios que contienen masas de aceites o gomas, esta semilla o nuez se encuentra en un receptáculo bajo la parte carnosa. De la semilla se obtiene un aceite que se llama cardol; también lo importamos. El componente principal de éstos es cardol, sustancia cáustica y venenosa que se evapora calentando las nueces. La planta crece en suelos pobres y rinde frutos al tercer año de vida (Cáceres, 2004).

Entre sus propiedades se le adjudican algunas como la de eliminar la celulitis y grasas localizadas, disminuir los niveles de colesterol malo y triglicéridos, eliminar exceso de ácido úrico y depurar el organismo por su alto contenido de fibras, tonifica la piel y los músculos, ayuda a mejorar la tensión arterial, ayuda a tratar la artitritis. Además, las semillas de nuez de la India dan sensación de saciedad y ayudan a controlar la ansiedad, permitiendo además ser un suave laxante y diurético natural. También se le adjudican propiedades como el apoyo en la pérdida de peso, tratar la hemorroides, mejorar el estado de la piel, reduce el acné y estimula el crecimiento del cabello (Moro y Basile, 2000).

Secado solar de la semilla del marañón (nuez de la india). El secado solar es una mejor alternativa que permite sustituir al secado natural y al mecánico artificial. Además de las ventajas de conservación a

largo plazo, reducción del volumen, relativa facilidad para su rehidratación, así como la conservación de una buena parte de los elementos nutrimentales y organolépticos y asegurar su disponibilidad (Romero, *et. al*., 2016).

El secado más común de la nuez de la india es mediante secadores de gas y eléctricos, algunos hornos eléctricos trabajan con paneles fotovoltaicos; se han caracterizado empresas de tres niveles de acuerdo a su capacidad de producción: procesadores artesanales, semiindustriales e industriales. Los procesos de deshidratado en estos hornos son largos, por ejemplo, en el caso de la piña duran 12 horas y en el caso del guineo, 24 horas. El proceso de deshidratación del marañón se lleva a cabo a una temperatura de 45 °C, motivo por el cual es más prolongado (2-3 días) y arroja un rendimiento del 25% sin considerar exposición al sol. El tiempo de vida útil establecido para sus productos es de 4 meses. Se utilizan también secadores de aire forzado a 70 ºC, los cuales tienen el inconveniente de utilizar además gas para proporcionar el calor del proceso, lo cual trae como consecuencia un consumo muy elevado de combustible y energía (Banchero, 2008).

Para la aplicación de las tecnologías de secado solar es fundamental el conocimiento de las propiedades de los alimentos deshidratados, con el objeto de optimizar este proceso desde el punto de vista energético y poder garantizar la conservación de sus cualidades organolépticas y nutrimentales (M. de León, *et. al*., 2002). Para lo anterior se presenta un estudio experimental que permite analizar el comportamiento de las cinéticas de deshidratación, aplicando condiciones controladas y la energía solar, comparando los resultados con el secado tradicional a cielo abierto.

Se detalla en el apartado del estudio experimental los materiales utilizados y el método de trabajo llevado a cabo para la deshidratación de la nuez de la india, se explica también la instrumentación de los secadores solares utilizados en la experimentación y aparatos de medición utilizados. Se presenta en el apartado de Resultados experimentales y discusión el comportamiento de los principales parámetros climatológicos que influyen en la deshidratación como son la temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar de un día soleado durante los días de prueba a manera de ejemplo; se muestra además, el estudio de las cinéticas de secado solar, contenido de humedad y velocidad de secado obtenidas en un secador directo tipo gabinete sin convección, comparado con el deshidratado en un secador convencional con calentamiento eléctrico no convectivo a temperatura controlada en un rango entre 55 °C y 65 °C. Finalmente, se concluye presentando los principales datos que experimentalmente nos llevan a determinar las condiciones y método de secado óptimo de la hoja de naranja amarga en función de las tecnologías evaluadas.

2. RECOMENDACIONES

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se analiza experimentalmente el proceso de secado de la nuez de la india (Anacardium occidentale) en un secador solar tipo gabinete y en un secador convencional con calentamiento eléctrico no convectivo a temperatura controlada en un rango entre 55 °C y 65 °C y el secado tradicional a cielo abierto.

2.1 Materiales Y Métodos.

Materia prima. Se abrieron las nueces cultivadas en Campeche, Campeche, retirando las semillas del marañón de la carcasa que las cubre y se seleccionaron de acuerdo a las que tenían mejor integridad en su estructura física, ya que algunas resultaron fraccionadas durante este proceso. Se lavaron y se seleccionaron para obtener un grupo homogéneo, basado en la madurez, tamaño y color. Se pesaron y se midió el ancho, largo y espesor de cada semilla.

Métodos. Como se mencionó anteriormente, en este trabajo, se analiza experimentalmente el proceso de deshidratación de la nuez de la india en un secador convencional no convectivo con calentamiento eléctrico, en un secador solar tipo gabinete y a cielo abierto. Se pesaron 12 g de nueces para cada prueba realizada.

Secador eléctrico no convectivo. Para la obtención de la cinética de secado, se utilizó un horno eléctrico marca Riossa sin convección de aire. Se

registró la pérdida de peso mediante un software y se variaron las temperaturas de secado en cada prueba que se llevó a cabo.

Secador solar directo tipo gabinete. Se empleó un secador solar de tipo directo construido en material plástico transparente con una superficie de tratamiento de 0.5 m2. La cámara contiene una charola absorbedora de la radiación solar en donde se coloca el producto. Cuenta con perforaciones en las partes laterales, fondo y trasera, para permitir la circulación y extracción del aire húmedo caliente. La superficie frontal tiene una pendiente de 20° para aprovechar la radiación solar incidente y permitir en su caso la condensación y escurrimiento del agua. Puede operar en convección natural o forzada, mediante un ventilador colocado en la parte trasera, de una potencia de 20 W, y permite una velocidad del aire máxima de 2 ms-1. En este trabajo se utilizaron un secador solar operando a convección natural.

La figura 1 muestra el secador solar directo tipo gabinete utilizado (SSD).



Fig. 1. Secador solar directo tipo gabinete

Secado solar a cielo abierto. Con la finalidad de comparar el proceso de secado en gabinete y en horno se trabajó el secado a cielo abierto colocando las nueces sobre una base rígida de plástico obscuro y se cubrió con una malla transparente muy ligera para evitar que las nueces fueran arrastradas en caso de vientos fuertes, se cuidó de no superponerlas y se dejaron hasta la puesta del sol.

En cada secador se registró la temperatura y la humedad relativa dentro de las cámaras de secado y la pérdida de peso de las muestras.



Fig. 2. Secado a cielo abierto.

2.2 Instrumentación

Humedad. Para la determinación de la humedad se utilizó un analizador de humedad, marca Boeco modelo BMA 150, , con una precisión de ± 0.01% mg. Se cortaron las semillas en porciones diminutas y se colocó una muestra de aproximadamente 1.0 g, procediéndose a su deshidratación. Este procedimiento se realizó antes y después de realizar las diferentes cinéticas de secado.

Actividad de agua (αw). La actividad de agua es un parámetro que determina la estabilidad de los alimentos con respecto a la humedad ambiental. Se determinó la actividad de agua para la semilla fresca y posteriormente para la seca. Se utilizó un equipo marca Rotronic Hygropalm de tipo portátil, con una precisión de ± 0.01% mg.

Medición de pérdida de peso. Se utilizó una balanza digital de alta precisión marca Boeco modelo BPS 40 plus. Se midió la pérdida de peso cada hora del día.

Termómetros. Se utilizaron termómetros de esfera, marca MeI (exactitud ± 1.0 °C) y digitales, marca OEM (exactitud 1.0 °C), con los cuales se midió las temperaturas dentro de las cámaras de secado.

Condiciones Climatológicas. Durante el período de pruebas se registraron los parámetros climatológicos en la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la UAC. Las características (datos del fabricante) son los mostrados en la Tabla 1:

Tabla 1. Características y descripción de los instrumentos de medición de la estación meteorológica.

VARIABLE	*DESCRIPCIÓN*	*MODELO*	*ERROR MÁXIMO*
Radiación global	Piranómetro marca LI-COR	LI-200R	Azimut: < ± 1% sobre 360º a 45º de elevación
Humedad relativa	NRG Systems	RH-5X	± 3%
Temperatura ambiente	NRG Systems	110S	± 1.1°C
Dirección del viento	NRG Systems	Series #200P	± 3º
Anemómetro	Windsensor	P2546C-OPR	± 0.3 m/s

Fuente: Elaboración propia con datos de proveedor

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES y DISCUSIÓN.

El estudio experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Secado Solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. El período de pruebas fue del 5 de abril al 4 de mayo del 2018. Para efecto de ejemplificar los resultados obtenidos se consideró un día de prueba soleado, en este caso, el día 26 de abril del 2018.

En la Tabla 2, se presentan las humedades iniciales y finales y actividad del agua de la semilla fresca y seca. Las humedades iniciales y finales obtenidas variaron muy poco, entre 50 % y 40 % y entre 6 % y 4 %, respectivamente. Los valores finales de la aw indican que no hay posibilidad de crecimiento microbiano en el producto deshidratado obtenido.

Tabla 2. Humedades (%) y actividad del agua (aw) para las tres temperaturas seleccionadas.

TEMPERATURA	HUMEDAD (%)		a_w	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
55 °C	50.68	6.57	0.690	0.201
65 °C	42.74	5.70	0.662	0.289
Secado con convección natural	45.26	4.85	0.69	0.209
Cielo abierto	44.05	5.5	0.66	0.32

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1, se presentan las evoluciones de los parámetros climatológicos durante las pruebas del 26 de abril. Como puede observarse durante los días de prueba, la irradiancia global máxima alcanzada fue de 980 W/m^2, siendo el intervalo de los valores máximos promedio entre 850 W/m^2 y 950 W/m2. Los valores de la temperatura ambiente oscilaron entre 30 ºC y 36.3 ºC, siendo la temperatura máxima lograda 38.2 ºC. Por otro lado, el valor mínimo que alcanzó la humedad relativa en el día fue 43 %, el promedio mínimo en los días de prueba osciló entre 39 % y 45 %.

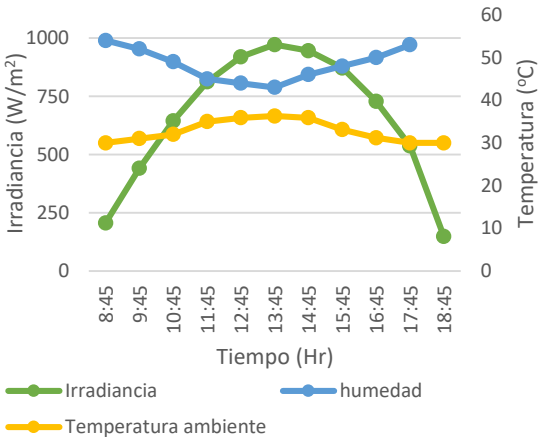


Fig. 2. Irradiancia solar global, temperatura ambiente y humedad relativa el día 26 de abril del 2018.

3.1 Secado no convectivo a temperatura controlada.

Se llevaron a cabo las pruebas de deshidratación de las semillas de marañón (nuez de la india) obteniéndose las cinéticas de secado a temperaturas controladas de 55 °C y 65 °C, realizándose tres

experimentos por cada una de ellas. Las semillas deshidratadas tuvieron un peso final promedio de 9.3 g en promedio. En el horno no convectivo se introdujeron 12 g de semillas.

La Figura 2 muestra el comportamiento del contenido de humedad en base seca para las dos temperaturas establecidas, con tiempos de secado de 1080 minutos para la temperatura de 65 °C y 1280 minutos para 55 °C.

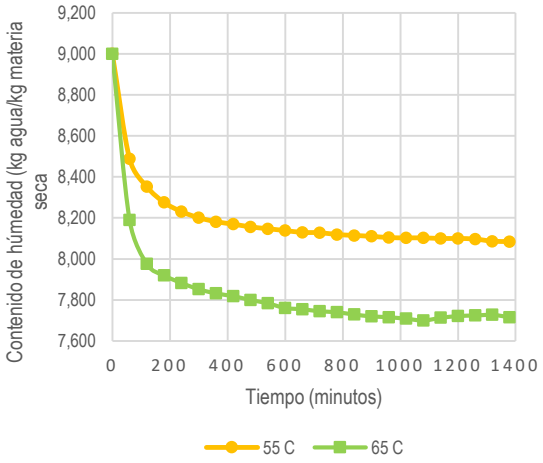


Fig. 3. Variación del contenido de humedad respecto al tiempo de secado en condiciones controladas a 55 °C y 65 °C en el secador eléctrico.

La Figura 3, representa las evoluciones de la velocidad de secado en función del contenido de humedad para cada una de las temperaturas de secado. Tanto en 55 °C como en 65 °C se presentaron las velocidades muy constantes y decrecientes, no se presentaron periodos de velocidades intermitentes, esto se puede notar también en la figura 2.

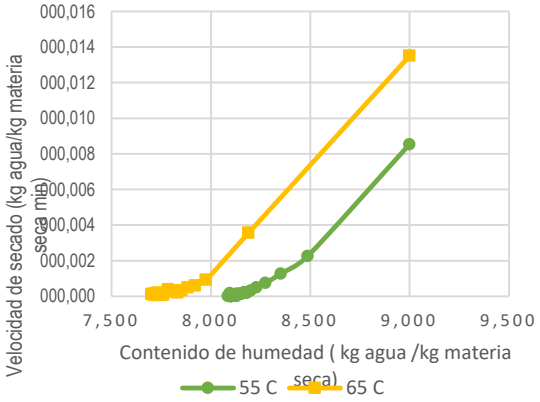


Fig. 3. Variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad a 55 °C y 65 °C en el secador eléctrico.

3.2 Secado solar directo y cielo abierto

La gráfica 4 muestra las temperaturas alcanzadas en el interior de la cámaras de secado de los secadores funcionando con convección natural y la irradiancia durante el día analizado como ejemplo.

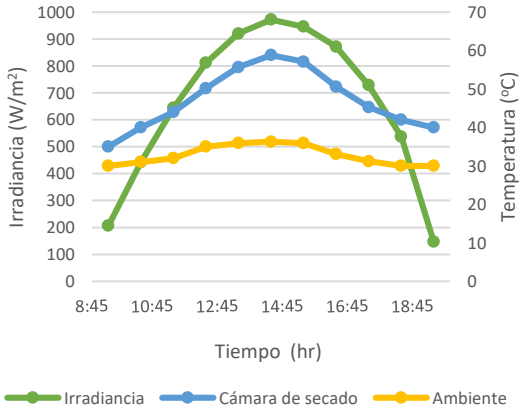


Fig. 4. Comportamiento de la irradiancia solar, la temperatura al interior de la cámara de secado del secador solar directo con convección natural y la temperatura ambiente.

Como puede observarse en la figura 4, las temperaturas en la cámara de secado del secador con convección natural es relativamente elevada, se obtuvieron hasta 58 °C a las 12 del día, en este momento la irradiancia solar medida fue de 972 W/m^2; un punto importante que se debe analizar es

que esta irradiancia es moderada ya que se alcanzan lecturas por arriba de los 1000 W/m^2, lo cual indica que el secador solar puede ser más eficiente; en cuanto a la temperatura ambiente se obtuvieron temperaturas máximas de 38 °C. La coincidencia de las temperaturas más altas en la cámara de secado con la irradiancia solar obtenida en el día de prueba es clara.

La figura 5 presenta la evolución del contenido de humedad de las semillas en el secador funcionando con convección natural.

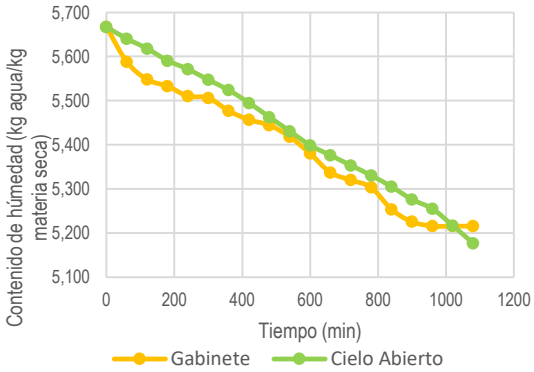


Fig. 5. Variación del contenido de humedad en los secadores solares con convección natural y a cielo abierto.

Como se puede observar, la cinética a convección natural en este tipo de secadores es mucho más rápida que la correspondiente a cielo abierto, debido básicamente a que se obtiene una mayor temperatura, a causa de un menor intercambio térmico con el aire que se encuentra a una velocidad baja. En el caso de cielo abierto se alcanza una temperatura menor a debido a una mayor circulación del aire ambiente en el área de secado, resultando una temperatura menor que en el caso de la convección natural. Este efecto se puede observar en los tiempos correspondientes de secado, en donde se tiene para convección natural 1020 minutos y 1500 minutos para cielo abierto.

La Gráfica 6 presenta la variación de las velocidades de secado en el secador directo y cielo abierto en función del contenido de humedad.

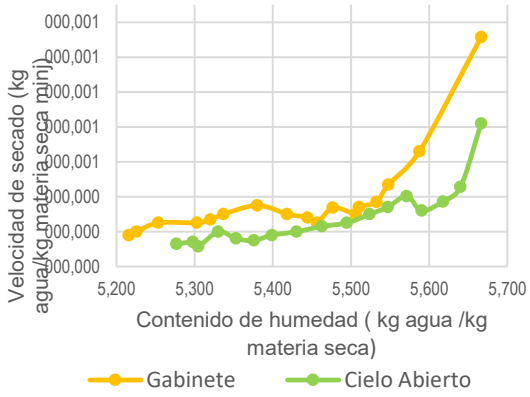


Fig. 6. Variación de la velocidad de secado con respecto a la variación del contenido de humedad obtenido con los secadores solares con y sin convección forzada.

En el caso del secador con convección natural no se observó ningún periodo de velocidad constante, la velocidad más alta fue la de convección natural con un tiempo de secado de 1020 minutos. Resulta importante comparar este tiempo con el obtenido en el horno eléctrico a 65 °C, en el que se encontró la velocidad más alta en un tiempo de secado de 1080 minutos (muy cerca de los tiempos de secado obtenidos en el secador directo con convección natural).

4. CONCLUSIONES

Las cinéticas de secado bajo condiciones controladas mostraron tiempos de deshidratación entre 18 horas sol y 21.3 horas sol a 55 °C y 65 °C, respectivamente, siendo lo óptimo 65 °C. Los tiempos de secado obtenidos en el gabinete solar con convección natural fueron más cortos que en el caso de secado a cielo abierto, 17 horas para convección natural y 25 horas en cielo abierto, por lo tanto, se encontró que el secado solar directo en secador de gabinete con convección natrual es muy similar a las condiciones controladas de 55 °C y 65 °C, arrojando prácticamente los mismos tiempos y velocidades de secado que en 55 °C en un día con temperaturas y sol moderado, por lo tanto, se encontró que es muy justifiado promover este tipo de tecnología debido a que en convección natural se pueden alcanzar temperaturas más altas o cercanas a los 55 °C. Es importante mencionar que el secado a cielo abierto resultó ser la tecnología más lenta además de los inconvenientes que resultan debido a la exposición del producto a deshidratar a las condiciones climáticas y a los insectos, roedores, etc., lo cual contribuye a disminuir la calidad del producto final.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que es factible el secado solar de la semilla de marañón (nuez de la India) mediante el secado solar en gabinete, obteniendo una ventaja considerable sobre el secado en horno eléctrico debido a que se logra alcanzar un ahorro energético importante con poca inversión y mínimo mantenimiento, obteneniendo un producto deshidratado de alta calidad, contribuyendo además al cuidado del medio ambiente.

REFERENCIAS

SENER-Gobierno de la República Mexicana. *Plan nacional de Desarrollo 2013-2018. Programa especial para el aprovechamiento de las energías renovables.*

Conacyt-Gobierno del Estado de Campeche. (2014). *Agenda Estatal de Innovación de Campeche. Documentos de trabajo*.

Galdámez Cáceres Antonio. (2004). *Guía técnica del cultivo del marañón. Programa Nacional de frutas de El Salvador.* Ministerio de Agricultura y Ganadería. 1ª. Edición.

Moro CO, Basile G. (2000). *Obesity and medicinal plants. Fitoterapia.*71:73–82.

Romero Indira, et. al. (2016). *Fortalecimiento de la cadena de valor de los snacks nutritivos con base en fruta deshidratada*. Documentos de Proyecto. Naciones Unidas-CEPAL-Gobierno de El Salvador.

Banchero Luján, Carballo Sergio, Telesca Juan, (2008). *Manual de secado solar de especies medicinales y aromáticas para predios familiares*. Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, Montevideo – Uruguay.

M. Augustus Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya. (2002). *A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers.* Renew Sustain Energy Rev, 6 (4) pp. 367–393.

Jeff MJ. (Pharm D). (2002). *Therapeutic Research Facility. Natural Medicines Comprehensive Database*, 4th ed.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE UN COMPRESOR CENTRÍFUGO

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PERFORMANCE OF A CENTRIFUGAL COMPRESSOR

MSc. Alejandro Torres Aldaco[*], PhD. Raúl Lugo Leyte[*], PhD. Miguel Toledo Velázquez[**], PhD. Helen Lugo Méndez*[a], Msc. Judith Cervantes Ruiz[***]

*Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. Av. San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina, 09340, Iztapalapa, CDMX, México.
Tel 52 55 58044644 Fax 52 55 58044900
ata@xanum.uam.mx
*[a]Universidad Autónoma Metropolitana – Cuajimalpa, Departamento de Proceso y Tecnología, 05348, Cuajimalpa, CDMX, México.
[**]Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica- Zacatenco. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Zacatenco, Del. Gustavo A. Madero, 07738, CDMX, México.
[***]Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, División de Ingeniería Química y Bioquímica. Av. Tecnológico s/n C.P. 55210, Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos Estado de México

Resumen: En este trabajo se evaluaron las inestabilidades de flujo del turbocompresor, forzando al compresor a entrar en la condición de bombeo, incrementando la resistencia al flujo mediante una válvula en la descarga. Para la realización de este trabajo se presenta la construcción e instrumentación del banco de pruebas de turbocompresores para su caracterización. Se comparte la experiencia adquirida durante la instalación y puesta en marcha del sistema. Se evaluó un turbocompresor centrífugo HOLSET HT3B accionado por un motor eléctrico operando entre 10,000 y 25,000 rpm, acoplados mecánicamente. La base del sistema se construyó de una placa de acero rectificada para reducir los niveles de vibración. Para la caracterización del turbocompresor, se usaron sensores de presión resistivos, termopares tipo k , tubos Pitot en la succión y descarga. La velocidad de giro se reguló por medio de un control de revoluciones incluido en el motor. Se adaptó un sistema de lubricación con un deposito de aceite de 1.5 l y una bomba centrifuga de 0.5 hp. Se realizó la puesta en marcha del banco y se obtuvieron las curvas características del turbocompresor.

Palabras clave: Turbocompresor, bombeo, banco de prueba, mapa de operación

Abstract: In this work, turbocharger flow instabilities were evaluated, forcing the compressor to enter the pumping condition, increasing the resistance to flow through a valve in the discharge. In order to carry out this work, the construction and instrumentation of the turbo compressor test bench for its characterization is presented. The experience acquired during the installation and commissioning of the system is shared. A centrifugal turbocharger HOLSET HT3B was evaluated, powered by an electric motor operating between 10,000 and 25,000 rpm, mechanically coupled. The base of the system was constructed of a rectified steel plate to reduce vibration levels. For the characterization of the turbocharger, resistive pressure sensors, type K thermocouples, pitot tubes in the suction and discharge were used. The speed of rotation was regulated by means of a speed control included in the engine. A lubrication system was adapted with a 1.5 liter oil tank and a 0.5 hp centrifugal pump. The start-up of the bank was carried out and the characteristic curves of the turbocharger were obtained.

Keywords: Turbocharger, surge, test bench, operation map

1. INTRODUCCIÓN

Las tendencias actuales de investigación en compresores centrífugos están orientadas a incrementar la eficiencia, el desempeño, la generación de conocimiento y la comprensión de los mecanismos precursores de los fenómenos internos de los compresores; estos enfoques convergen en el interés de desarrollar modelos matemáticos que incorporan información nueva, con la finalidad de desarrollar nuevos métodos rigurosos de diseño de compresores, que puedan lograr mejores capacidades de funcionamiento en su rango de operación. El desarrollo tecnológico de las herramientas de cómputo, además durante las pasadas tres décadas se han generado poderosos equipos de medición del campo de flujo, como los equipos de anemometría láser doppler (LDA) o de velocimetría de imagen de partículas (PIV), ambas herramientas de medición permiten la detección de estructuras turbulentas y fenómenos de flujo, antes no registrados. A pesar de los avances logrados, las mediciones dentro de las turbo-máquinas se han desarrollado lentamente, debido a la complejidad inherente de los compresores que no permiten ser instrumentados en el interior, además considerando que e operan a velocidades de giro de 10,000 a 150,000 rpm (Abdel 1987). Por lo anterior, los desarrollos teóricos de los fenómenos turbulentos que se producen en los compresores centrífugos, la teoría que los describe, hoy por hoy, ésta se encuentra incompleta y estancada. Lo anterior limita los avances en investigación y comprensión de los fenómenos de fluidos compresibles.

El problema de inestabilidad de flujo en compresores centrífugos, se está abordando a través de la formulación de modelos matemáticos basados en la ecuación de Navier Stokes y su solución numérica, esto se conoce como la dinámica de fluidos computacional (CFD) (González 2006), que busca fundamentar las reglas heurísticas, producto del trabajo de campo, limitantes de operación y discernir respecto a los mecanismos que promueven los fenómenos de inestabilidad; esta información se concentra en los mapas de operación de los compresores, asociados a una geometría particular del compresor, fluido de trabajo con propiedades definidas y condiciones de referencia establecidas. El escenario de los compresores se vuelve más complejo, en el contexto de la industria del gas natural, donde la composición del fluido de trabajo cambia en el tiempo, o que los equipos operan bajo condiciones de operación distintas a las condiciones de diseño, debido a la degradación de los equipos, esto obliga a realizar reingeniería de los equipos y actualizar los mapas de operación para describir el desempeño real del equipo, esto con frecuencia, implica que en la reingeniería de los compresores, hay que cambiar la geometría de los rotores, para adaptar el compresor a las nuevas condiciones del fluido de trabajo y del proceso.

1.1.- COMPRESORES

Los compresores centrífugos presentan diversas configuraciones de acuerdo a su patrón de flujo: flujo axial, flujo centrífugo, o una combinación de ambos denominado de flujo mixto. Los compresores tienen la función de proporcionar energía cinética al fluido de trabajo, a través de la interacción del rotor y el fluido; la energía cinética del fluido se convierte en un incremento de la presión del fluido durante su trayectoria en el difusor. En la Figura 1 se muestran las partes de un compresor centrífugo; r_1 y r_2 corresponden a los radios del rotor medidos en la punta y en la raíz de los álabes, respectivamente; la carcasa estacionaria del rotor se conoce como difusor, donde el gas circula por los diversos conductos, en esta zona, es donde el gas experimenta una desaceleración, mediante este proceso, la energía cinética se transforma en presión estática, este proceso de transformación de la energía se denomina difusión.

Uno de los componentes importante de los compresores, es el rotor, éste elemento giratorio tiene la función de proporcionar la energía cinética al gas que ingresa a la zona de succión o

comúnmente llamado ojo del compresor. El gas **se** mueve a gran velocidad, por los canales formados por los impulsores del rotor, al salir de éstos, el gas circula a través del difusor, aquí los álabes del difusor dirigen el gas por las distintas zonas del difusor, en este trayecto se convierte de energía cinética a energía de presión. Los álabes impulsores del rotor al girar en la misma dirección que circula el gas a través del área de succión y de descarga, provocan que la presión estática del gas se incremente. El aumento de la presión estática restante se realiza en el difusor. En la práctica, se considera que "el 50 % del incremento de presión, se tiene en el impulsor y el otro 50 % en el difusor". Cuando las velocidades de flujo son elevadas en las partes internas del compresor, es decir si los números de Mach son cercanos a la unidad, en diferentes puntos de la trayectoria de la corriente de gas, se deben considerar los efectos de compresibilidad, para poder describir de forma más exacta los estados termodinámicos del gas durante el proceso de compresión.

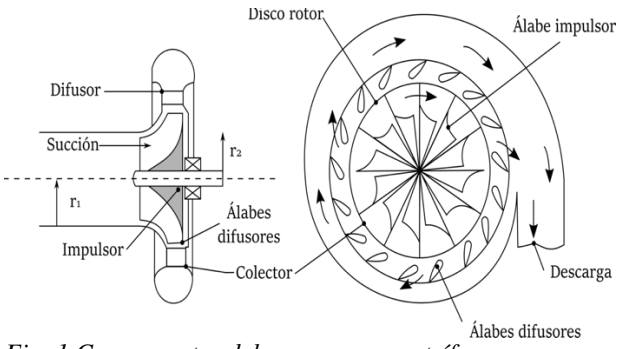


Fig. 1 Componentes del compresor centrífugo.

Los álabes utilizados en los rotores se clasifican en tres tipos principales: curvados hacia adelante, curvados hacia atrás y radiales, como se muestra en la Fig. 2. Los impulsores tienden a someterse a grandes tensiones, debido a la fuerza centrífuga y a los esfuerzos de flexión que provoca el fluido de trabajo sobre ellos (Guangchi 2009; Oppenheim 2000). Se destacan los álabes curvados hacia atrás; debido a que presentan mayores ventajas operativas que desventajas.

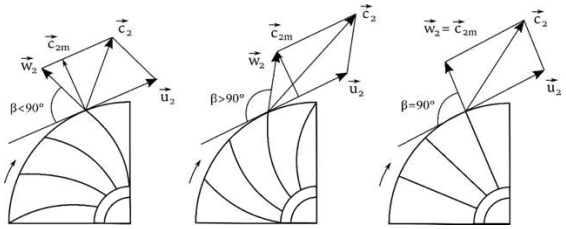


Fig. 2 Tipos de álabes impulsores en los rotores; a) Álabes curvados hacia atrás, β < 90°; b) Álabes curvados hacia adelante, β > 90°; c) Álabes radiales, β = 90°.

El rotor de los compresores centrífugos se forma por el conjunto de álabes, requeridos para cumplir la tarea de compresión específica del fluido de trabajo. Los álabes se colocan en dirección radial y son asentados sobre la base de un disco que gira alrededor de un eje. Los álabes se clasifican por su diseño, función y ubicación en el compresor; se denomina, álabe inductor cuando se encuentra en la zona de inducción y el borde de ataque del álabe está dispuesto axialmente a las líneas de corriente; su función es dirigir eficientemente el fluido a la zona de impulsión. En esta zona, el fluido es guiado por los canales, formados por los álabes impulsores del disco rotor, a la dirección de flujo, provocando que el fluido converja en el difusor, esto incrementa la presión del gas, debido a la conversión de energía cinética del gas que circula por el rotor a energía de presión en el difusor.

1.2. MAPA DEL COMPRESOR

El comportamiento de un compresor se especifica a través curvas que relacionan la velocidad de giro, relación de presiones y el flujo másico que circula por el compresor. Los puntos de operación de estado estable son indicados por líneas de velocidad constante, llamadas curvas características del compresor figura 3. Aquí se establece el rango de operación estable del compresor que está acotado por los límites de diseño del compresor. Para flujos altos el límite lo determina la capacidad física del compresor determina la frontera de operación estable a esto se denomina línea de capacidad, para flujos bajos, el limite lo determinan la aparición de inestabilidades aerodinámicas que define la línea de bombeo o *línea de inestabilidad***.** Conforme aumenta la demanda de flujo en el sistema, la presión

entregada por el compresor decrece hasta hacerse nula. Conforme la demanda de flujo disminuye, la operación del compresor se vuelve inestable. La figura 3 muestra las curvas características y los límites de operación del compresor.

Tabla 1. Parámetros geométricos del turbocompresor.

r_h=0.023 m	r_t=0.073 m	r_2=0.109 m
t=0.0015 m	d_2=0.0093 m	m=0.0036 m
β_2=29°	r_3/r_2=1.49	d_3=0.0093 m

Nomenclatura
C_p Calor específico a presión constante
P Presión
T Temperatura
γ índice adiabático
Δ incremento
C velocidad absoluta
n índice politrópico
1 entrada
2 salida

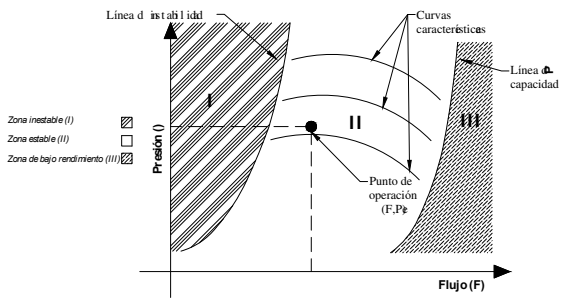


Figura 3 Mapa de operación de un compresor

1.2. SURGE

También conocido como inestabilidad dinámica que ocurre en compresores dinámicos, generalmente centrífugos en donde se presentan oscilaciones en el flujo manejado por el compresor. Es un fenómeno de anti bombeo o reflujo que se produce en los compresores centrífugos y axiales, cuando el caudal es tan pequeño que tiende a retroceder en los difusores del equipo provocando vibraciones y un mal funcionamiento del compresor. Si este fenómeno se repite varias veces o se prolonga durante mucho tiempo durante el funcionamiento del compresor este puede llegar a dañarse gravemente o incluso causar heridas al operario.

Existen dos tipos de "*Surge*"

1.4 Surge leve

Se caracteriza por fluctuaciones momentáneas de la tasa de flujo, el cual es el estado subsiguiente del *Stall,* por incrementos leves en la temperatura de descarga, pulsaciones leves del flujo y la presión de descarga, así como un aumento de la vibración axial y radial.

1.5 Surge violento

Se caracteriza por fuertes ruidos en el compresor, golpeteos en las válvulas de control de descarga, altos incrementos en la temperatura de descarga y pulsaciones rápidas en la presión de descarga y el flujo manejado por el compresor, en este caso la incidencia es alta.

Así como el surge es causado generalmente por un bajo flujo de descarga, existe otro fenómeno contrario a este denominado *Choke* o *Stonewall* causado por la fricción de la alta velocidad del compresor (Sørvik 2012).

Un mapa del compresor es solo un fragmento de la información más importante para describir el Surge, dicho mapa muestra la curva característica del compresor para diversas condiciones de funcionamiento; tales como se observa en la figura superior. Cada curva representa el aumento en la presión de descarga desarrollada por el compresor, mientras que el flujo de la succión es variado para una condición operacional dada /tal como la velocidad). La condición operacional no se limita a estas curvas anterior mostradas, la misma también puede ser ajustada a valores intermedios. El eje X es el flujo volumétrico el eje Y representa la presión de descarga. Las curvas características suministradas por el fabricante del compresor, cubren la región con pendiente negativa y termina donde la pendiente se aproxima a cero, una pendiente negativa significa que la presión deberá cambiar en la dirección opuesta para un cambio de flujo y una inclinación igual a cero significa que la presión no cambiará en absoluto para un cambio de flujo. Si se traza una curva a través de los puntos donde la pendiente se hace cero para cada curva característica, la región a la izquierda de esta línea donde ocurre la inestabilidad (surge).

Existen diversas causas que pueden generar el fenómeno de *Surge* en un compresor, algunas de ellas son las siguientes:

- La gran concentración de suciedad en el filtro de entrada al compresor reduce la presión de succión, causando una mayor relación de compresión
- Disminución en el flujo de entrada lo que se traduce en una mayor relación de presión
- Problemas en la válvula de recirculación
- Fuga a través de los sellos inter etapa
- Suciedad en las paredes de los impulsores
- Cambio en la gravedad especifica del gas
- Si la presión de succión y la velocidad de rotación se mantienen constantes y se incrementa la presión de descarga de forma violenta.
- Si la presión de descarga y la velocidad son constantes y se disminuye la presión de succión
- Si la presión de descarga y la presión de succión son constantes y se disminuye la velocidad rápidamente.
- Cuando el compresor no tiene la capacidad de producir suficiente cabezal para sobreponerse o vencer la resistencia impuesta, en este punto, el gas de la tubería de descarga revierte el flujo hacia el compresor de manera momentánea.

2. METODOLOGIA

Se construyo un banco de pruebas de compresores centrífugos con el objetivo de obtener experimentalmente los límites de operación del compresor como es la zona de bombeo, el mapa del compresor. La Figura 4 muestra la instalación del banco de pruebas, éste consiste de: turbocompresor centrífugo Holset HT3B fig. 4, motor eléctrico de 2.25 hp figura 5, flecha de impulsión; acoplamiento, succión del compresor; f) ducto de descarga del compresor; g) voltímetro y amperímetro, válvula de flujo, sistema de lubricación sensores de medición de presión, temperatura, velocidad,(Tabla 2) velocidad de giro, tarjeta de adquisición de datos National Instruments Ni-USB-6211. Para la medición presión se utilizaron sensores de presión Honeywell STP. El motor utilizado para el movimiento del turbocompresor tiene las siguientes características tensión, 120 volts, velocidad máxima 25,000 rpm peso kg. 2.65, potencia 2.25 hp Figura 5, permite un margen de sobrecarga superior a la corriente nominal. Para el acoplamiento de flechas se probaron diferentes coples, que permitieran tener la mejor alineación de las flechas y así disminuir el nivel de vibraciones. Se utilizo un turbocompresor centrífugo HOLSET HT3B, la tabla 1 muestra las características del compresor, dependiendo del tamaño del compresor, velocidad, condiciones de operación, etc. El diseño de experimentos consistió en medir la presión dinámica en la voluta del compresor utilizando 5 sensores de presión colocados cada 72º (fig. 6), se mide el flujo, presión, temperatura, velocidad del aire en la succión y la descarga. Las velocidades de giro que se estudiaron fueron 10000, 11500 y 13000 rpm. El flujo de aire se fijo en nueve condiciones para cada una de las velocidades de giro estudiadas, una vez establecidas las condiciones de operación, se realiza la adquisición de datos mediante el software LABVIEW, a los datos recabados se les realizo un análisis espectral de Transformada rápida de Fourier (FFT) (Rarrazabal 1999; González 2006) utilizando Matlab como plataforma de tratamiento de datos, realizando la exportación de datos a este y posteriormente almacenar los datos obtenidos en un archivo de Excel para graficarse. Se realizo la caracterización geométrica se refiere a parámetros geométricos: diámetros del impulsor y del difusor, espesores y alturas de los álabes, ancho axial a la salida del impulsor y del difusor, respectivamente relación A/R y el Trim, entre otros. La relación de áreas para la voluta se obtiene de la relación entre el área a la entrada y el área a la salida del difusor con un radio igual a R .

El Trim es una relación de áreas usada para describir el impulsor, y toma valores entre 0 y 100%; esto indica que a medida que el Trim se incrementa, la capacidad de flujo a la entrada del turbocompresor puede incrementarse (González 2010; Toledo 2003)

Tabla 2 Variables medidas del compresor

Variable	Punto de medición	Instrumentación
T_1	Succión	Termopar K
T_2	Descarga	Termopar K
P_2-P_1	Descarga y succión	Sensor de presión diferencial
C_2	Descarga	Anemómetro
C_1	Succión	Anemómetro



Figura 5. Banco de prueba de compresores centrifugos



Figura 5 Motor eléctrico que impulsa al compresor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La potencia suministrada al compresor se incrementa de 15 a 20%, con el cambio de operación en condición estable a una condición de inestabilidad en la región de bombeo. La figura 6 muestra el mapa de operación del compresor para las velocidades de giro estudiadas, se encontró que los limites de operación a 10000 rpm son 1.5 y 5.45 m^3/min, para 11500 rpm los limites son 3.9 a 9.57 m^3/min, para 13000 rpm los limites son 8.9 a 12.7 m^3/min. La frontera de la zona de bombeo corresponde a los límites inferiores de flujo para cada velocidad de giro. La figura 7 muestra el requerimiento de potencia eléctrica en el motor como función del flujo y la velocidad de giro estudiadas. El proceso de compresión real se aleja del ideal a medida que se reduce la velocidad de giro, aumentando la irreversibilidad del proceso y en consecuencia valor del índice politrópico. Con base al mapa de operación del turbocompresor, el punto de diseño está alrededor de 100,000 rpm con una eficiencia isoentrópica de compresión aproximada de 80% y una relación de presiones estática de 1.9, por consiguiente, el índice politrópico que se espera en el punto de diseño es de 1.49.

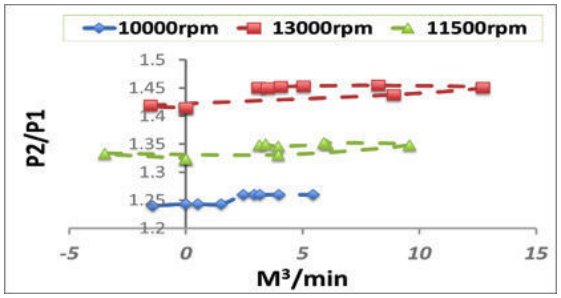


Figura 6 Mapa del compresor obtenido experimentalmente

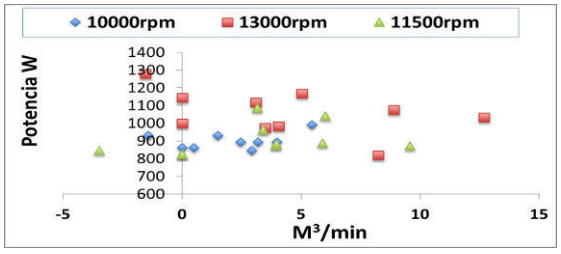


Figura 7. Potencia eléctrica en función del flujo.

corresponden a una condición de bombeo desarrollado o profundo como también es llamado. Con los resultados obtenidos verificamos que el banco de pruebas para compresores tiene la capacidad de detectar las inestabilidades de flujo de compresores centrífugos apoyados del sistema de

adquisición de datos que permitieron captar las variables de interés en tiempo real. Debido a que la condición de bombeo provoca esfuerzos importantes en el compresor como en el motor las pruebas se realizaron por periodos de 5 a 10 minutos, dejando enfriar el sistema por periodos iguales de tiempo. Mediante el tratamiento de señales en la figura 8 se muestra uno de los espectros de las señales adquiridas, estas se encuentran en el dominio del tiempo, con el tratamiento de las señales por transformada de Fourier, se obtienen resultados en el dominio de la frecuencia obteniendo como resultado la figura 9.

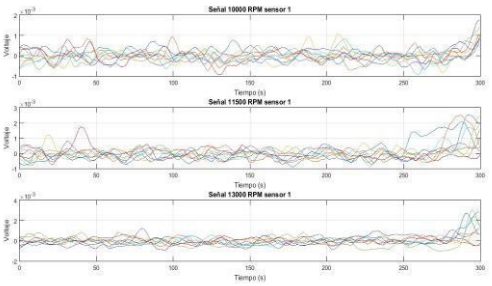


Figura 8 Fluctuación de la presión a diferentes velocidades de giro.

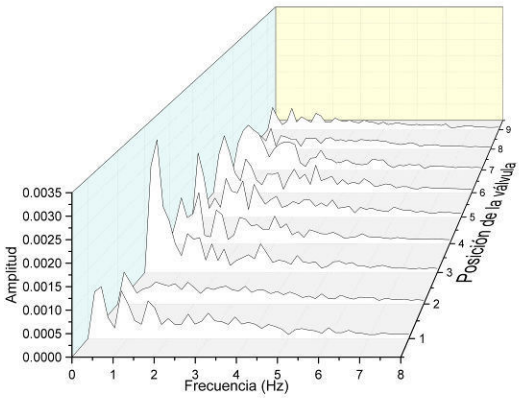


Figura 9 Espectro de la señal de presión para diferentes posiciones de la válvula de descarga.

Sin embargo es perceptible que se encuentran picos en las regiones de baja frecuencia, al realizar un acercamiento se observa como se lleva acabo una distribución de picos, con esto se puede inferir que las inestabilidades en el sistema se encuentran a bajas frecuencias, sin embargo se observo que no siempre se encuentran a las mismos valores de frecuencia. De igual manera de la figura 12 se puede decir que parte de las inestabilidades se presentan en las regiones de apertura intermedia de la valvula de salida del aire, esto puede ser debido al área disponible para el flujo de salida en combinación con un flujo de retorno del aire debido a que inicio el fenomeno de bombeo, a diferencia de lo esperado en las regiones, donde la valvula se encuentra mas cerrada, las amplitudes de las señales en el dominio de la frecuencia son menores, como es mecionado en este caso el área por la cual el retorno del aire es menor por lo cual se puede establecer que el sistema se encuentra en bombeo violento.

A medida que la velocidad del compresor incrementa, la amplitud de las inestabilidades, incrementan, otro caso que se muestra en la figura 10, muestra una distribución de inestabilidades.

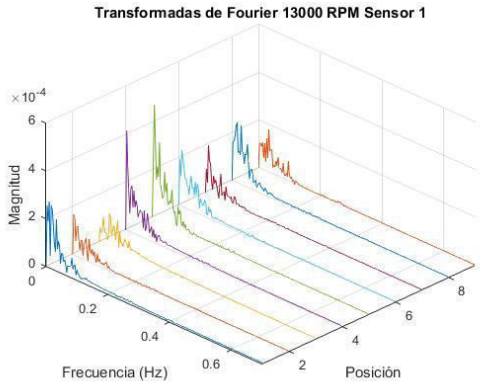


Figura 10 Espectro de las señales de presión con el análisis de FFT.

Donde a diferencia de la figura 11 se encuentra un patrón mejor distribuido, donde los picos de amplitud se encuentran en rangos similares esto debido que el fenómeno estudiado se encuentra mejor distribuido a lo largo de la voluta por lo cual no se presentan picos tan separados entra las diferentes aperturas de la válvula de salida del aire.

4. CONCLUSIONES

La potencia suministrada al compresor se incrementa de 15 a 20% , con el cambio de operación en condición estable a una condición de inestabilidad en la región de bombeo. El comportamiento del índice politrópico para cada

condición de operación, el índice frecuentemente es considerado es constante para cada región que constituye al turbocompresor (impulsor, difusor y voluta), sin embargo esto no es real, debido que el índice politrópico es función directa de la relación de presiones en cada región del compresor.

Las inestabilidades en el sistema debidas al fenomeno de bombeo se encuentran en frecuencias bajas de 0 a 7 Hz, sin embargo se observó que no siempre se encuentran a los mismos valores de frecuencia. Las amplitudes para una velocidad del compresor de 13000 rpm, se encuentra que en regiones donde las inestabilidades son menores se puede tener una variación de hasta un 99% en la amplitud de la señal de la inestabilidad.

El análisis espectral es una herramienta complementaria en el estudio de inestabilidades de flujo en los compresores centrífugos, sin embargo es dependiente del sistema de adquisición de datos que puede variar los resultados en funcion de la capacidad de muestreo de los sistemas.

REFERENCIAS

[Abdel-Hamid, A. N., Haupt, U., & Rautenberg, M. (1987, May). Unsteady flow characteristics in a centrifugal compressor with vaned diffuser. In ASME 1987 International Gas Turbine Conference and Exhibition (pp. V001T01A038-V001T01A038). American Society of Mechanical Engineers.

Rarrazaval, P. (1999). Análisis de señales. McGraw-Hill Interamericana. México.

De La Fraga, L. (2001). La Transformada Discreta de Fourier y la Transformada Rapida de Fourier.

González D., Osorio L., Tibaquirá J.E. Caracterización geométrica y técnica de un turbocompresor de un vehículo Mazda 4.5T. Scientia et Technica Año X22. No. UTP, ISSN 0122-1701, (2006).

Guangchi Y., Guang M. Jianping J. Turbocharger rotor dynamics with foundation excitation. Arch. Appl. Mech., vol. 79 (2009) 287-299.

[Oppenheim, A. V. S., Ronald, W., Ronald W Schafer, J. R., & GarcIA, T. J. P. (2000). Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto.

Salazar F. Fundamentos termodinámicos y metodologías para el diseño de turbocompresores. Tesis Lic. En Ingeniería en Energía, UAM-I, México, D.F., 2010.

Salazar F., Lugo L., Toledo M., Torres A., Tolentino G. Desarrollo de una metodología del proceso de diseño de un compresor centrífugo de una etapa. XIII Congreso y Exposición Latinoamericana de Turbomaquinaria, CELT-001-2012, 9-14, (2012).

Schobeiri M. Turbomachinery Flow Physics and Dynamic Performance, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Printed in Germany, (2005), 215-225.

Toledo M., Tolentino G., Cruz R., Romero D. Análisis Politrópico de un Compresor Centrífugo. Información Tecnológica, vol. 14 (4), (2003)

SØrvik, L. A. ÿ. (2012). Validation of Wet Gas Surge Phenomena (Master's thesis

SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN COLECTOR TÉRMICO SOLAR HECHO CON NEUMÁTICOS RECICLADOS.

SIMULATION AND VALIDATION OF THE PROTOTYPE OF A SOLAR THERMAL COLLECTOR MADE WITH RECYCLED TIRES.

MSc. Elkin A. Mora E.[*], MSc. Edison Martínez O.[*]
Jorge A. Velasco [*]

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, GIMUP.
Km 1 vía Pamplona Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
(0975) 685303.
E-mail: elkmes@gmail.com.
edisonmartinez@unipamplona.edu.co.
eflorez_75@hotmail.com.
antonio.velasco@unipamplona.edu.co.

Resumen: Esta investigación determino la viabilidad técnica de un colector térmico solar, construido mediante la reutilización de llantas y neumáticos usados y desechados, Este trabajo fue motivado buscando la mitigación del impacto ambiental que genera la gran cantidad de estos elementos desechados. Para ello se tomó como muestra en el estudio un neumático mediano de uso común en camiones ligeros, com capacidad de almacenamiento de aproximadamente 37 litros.

Las caracterización del comportamiento dinámico y térmico del colector se realizó en forma computacional, utilizando el software académico de simulación ANSYS®. Las condiciones de radiación solar utilizadas en el modelo son tomadas de la base de datos del IDEAM, para la ciudad de Pamplona. La simulación del colector fue validada experimentalmente mediante la medición de las temperaturas interior y exterior del colector. Los resultados obtenidos muestran que los neumáticos usados pueden ser utilizados como colectores solares y que el aprovechamiento energético o la transformación de energía solar a térmica cuenta con una eficiencia de 43%.

Palabras clave: Colector térmico solar, llantas, simulación.

Abstract: This research determined the technical feasibility of a solar thermal collector, built through the used and discarded tires. This work was motivated by the mitigation of the environmental impact generated by the large quantity of these discarded elements. For this purpose, a medium-sized tire commonly used in light trucks was studied. The capacity of storage of approximately 37 liters and supports without problems the variations of pressure and temperature, which is exposed to be used as solar thermal collector and storage tank.

The characterization of the dynamic and thermal behavior of the collector was carried out

in a computational way, using the ANSYS® simulation academic software. The solar radiation conditions used in the model are taken from the IDEAM database for the city of Pamplona. The collector simulation was validated experimentally by measuring the interior and exterior temperatures of the collector. The results obtained show that the used tires can be used as solar collectors and that the use of energy or the transformation of solar energy to thermal energy has an efficiency of 43%.

Keywords: Solar thermal collector**,** tires, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

En el 2003 la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) desarrollo y publico la ¨GUÍA DE ESPECIFICACIONES DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA PARA USO DOMESTICO CON ENERGIA SOLAR EN COLOMBIA´ en conjunto con el ICONTEC (UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, ICONTEC, 2003), establecen las especificaciones que debe cumplir cualquier sistema de este tipo que se quiera implementar, bien sea a nivel comercial o doméstico.

El neumático seleccionado para la investigación cumple con todos los requisitos exigidos, entre estos los valores de presión. Además los fabricantes garantizan estas características y se incluyen en la información grabada en el producto, como se ve en la Figura 1.

Figura 1. Especificaciones técnicas del neumático.



(TIRE RACK, 2017)

Otra característica ventajosa de los neumáticos es que no presentan corrosión con lo que se disminuye el costo asociado a la protección del material y esta condición no se pierden al ser usados, ya que solo se presenta desgaste en su banda de rodamiento más no en el perfil ni la estructura general del neumático.
En base a esto surge la propuesta de diseñar un sistema alternativo de colector térmico solar usando neumáticos desechados y así aprovechar estos residuos que han generado una gran problemática ambiental a nivel mundial.

2. DISEÑO DEL PROTOTIPO.

Para el diseño del colector térmico solar se buscaron neumáticos descartados y se procedió a determinar la capacidad de almacenamiento del prototipo, mediante el volumen de un toroide (ingenieriaycalculos.com, 2010-2017), el cual dio una capacidad aproximada de 36.7 litros en un neumático medida 6.50r15 cuyas dimensiones son las presentes en la Tabla 1.

Tabla 1. Características físicas del neumático usado como colector solar.

Diámetro exterior	Diámetro interior	Ancho de sección.
71.12 cm.	38.1 cm.	16.51cm.

(Espinosa, 2018 Vol. 39 (Nº 13))

Este neumático es de uso común en camperos, camionetas y camiones ligeros, según los valores obtenidos un solo neumático podría brindar la demanda diaria para una persona de agua caliente sanitaria

3. ANALISIS DINAMICO.

Para evaluar la operación del colector solar que se propone se realizó un balance energético, tomando como modelo un colector de placa plana debido a las similitudes de construcción que se tienen, este balance se basa en el desarrollado en cuba en el 2015 por Rodríguez m. Jeovany. et al (Rodriguez, 2015). Mediante las ecuaciones.

$$E_u = E_a - E_p$$

Ecuación 1 Energía Útil del Sistema.

Donde *Eu* es la energía útil del sistema, *Ea* y *Ep* son la energía absorbida y la energía pérdida por el sistema, respectivamente.

$$q_u = A_c \cdot F_R \cdot G_T\eta - A_C \cdot F_R \cdot U_L \cdot (T_i - T_{am})$$

Ecuación 2 Calor Útil.

Donde *GTη* corresponde a la radiación solar absorbida por efecto de la eficiencia de los materiales que lo conforman, *Ac* es el área de colección, *FR* queda definido como el factor de remoción de calor, *UL* se define como el coeficiente global de pérdidas, *Ti* es la temperatura de entrada del fluido y *Tam* es la temperatura ambiente. Entonces el calor útil se define como *qu*.
El método para evaluar el rendimiento térmico del colector expuesto a la radiación solar incidente de cualquier localidad en cuestión, depende de *Ti* y *To* que son las temperaturas de entrada y salida del fluido, respectivamente, al igual que *mm* definido como el flujo másico y *Cp* como la capacidad calorífica del agua.
Por lo tanto el calor útil del sistema puede definirse por la ecuación (3) como:

$$q_u = m_m \cdot C_p (T_o - T_i)$$

Ecuación 3 Calor Útil del sistema.

Simplificando la ecuación 2, se logra obtener la ecuación (4).

$$q_u = A_C \cdot F_R \cdot \left[G_T\eta - U_L \cdot (T_i - T_{am}) \right]$$

Ecuación 4

Definiendo *GT* como la radiación incidente en el plano inclinado del colector, *η* se determina como la eficiencia del sistema. A partir de esto se logra determinar la eficiencia térmica del colector *ηi* como se escribe en la ecuación (5) (Rodriguez, 2015).

$$\eta_i = \frac{q_u}{A_C \cdot G_T} = F_R\eta - \frac{F_R \cdot U_L \cdot (T_i - T_{am})}{G_T}$$

Ecuación 5 Eficiencia térmica del colector.

Con el fin de obtener la eficiencia térmica y para simplificar el cálculo y simular la operación del colector, se desarrolló un algoritmo en Matlab cuyo resultados fue un valor de eficiencia del sistema de 43.72% para las condiciones.

3.1 Simulación del Colector Térmico Solar.

La geometría del colector, se realizó mediante el software SOLIDWORKS obteniendo como resultado las figuras 2 y 3.

Figura 2. Vista en corte del colector térmico solar hecho con neumáticos.

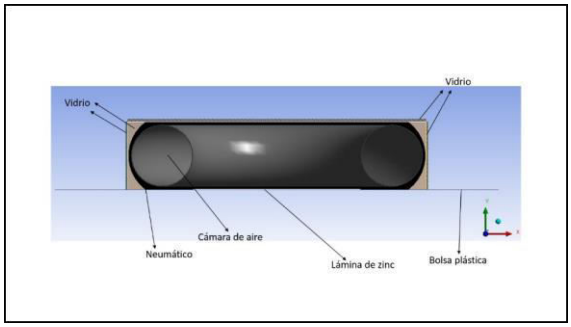
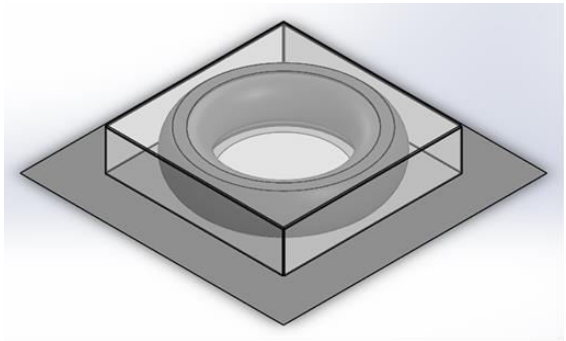


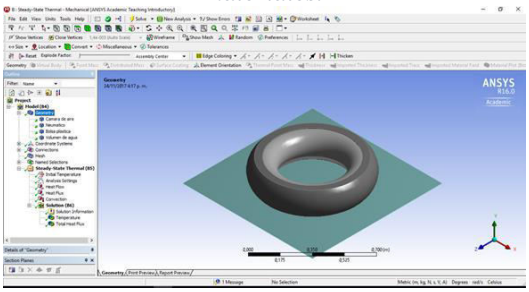
Figura 3. Vista panorámica del diseño del colector térmico solar hecho con neumáticos desechados.



La simulación del comportamiento del colector térmico solar hecho con neumáticos desechados se realizó mediante la implementación de las condiciones ambientales existentes en pamplona, para las variables de entrada en el software de elementos finitos ANSYS y luego de identificar las características de los materiales que componen el objeto de estudio mediante el software CES

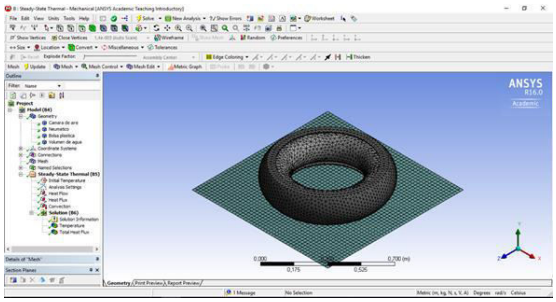
Edupack. De esta forma se identificó el posible comportamiento que tendría el colector para después confrontar con los datos experimentales.
La simulación se realizó teniendo en cuenta el colector como un sistema solar térmico en estado transitorio y se realizaron múltiples pruebas de enmallado hasta obtener una convergencia adecuada, sin aumentar el tiempo de simulación de forma importante.

Figura 4. Asignación de propiedades a los materiales.



Una vez asignadas las propiedades de los dos materiales se procede a realizar el enmallado de la pieza, asegurándose que el tamaño y distribución de la malla garantice la determinación óptima del comportamiento del colector. Luego de enmallar se procede a asignar los valores de radiación según los promedios que se presentaron durante el tiempo en el que se realizaron las pruebas al prototipo (Espinosa, 2018).

Figura 5. Enmallado del modelo del colector.



3.2 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación que se muestran en la Figura 6. Toman como variable la temperatura del agua dentro de la cámara, que se pueden apreciar en el corte Figuras 7 y 8.

Figura 6. Valores de temperatura en el colector.



Figura 7. Vista en corte del colector.

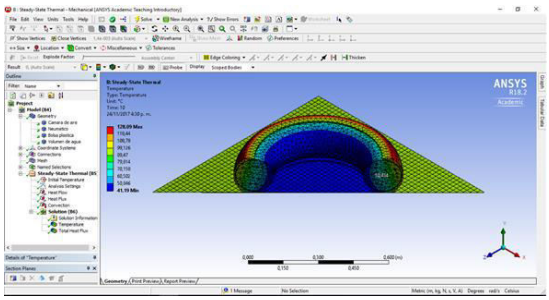
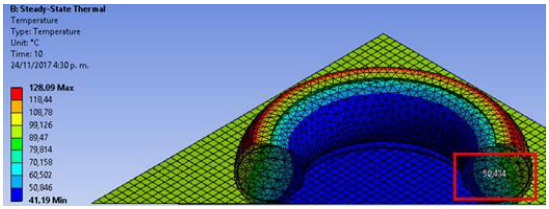


Figura 8. Vista en corte del colector.



La simulacion tambien permite ver el comportamiento de la radiacion solar en el colector, como se muestra en las Figuras 9 y 10.

Figura 9. Comportamiento de la radiación en el colector.

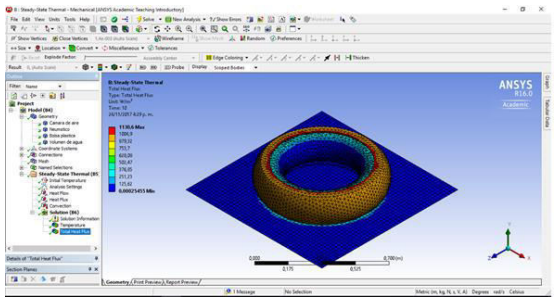
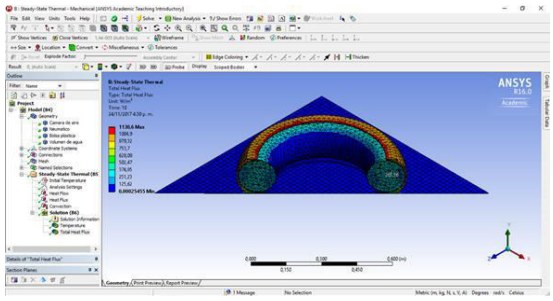


Figura 10. Comportamiento de la radiación, vista en corte del colector.



4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Las pruebas se realizaron durante un periodo de 30 días, este periodo se determinó para poder observar el comportamiento del colector en diferentes condiciones climáticas en los cuales se presentaron temperaturas ambiente que oscilan desde los 6 a los 19 ° C, así como días despejados nublados.

La toma de datos en el prototipo tuvo intervalos de una hora en los sensores de temperatura ubicados en la línea de alimentación de agua del grifo, en la salida de agua caliente del colector y la temperatura ambiente (Espinosa, 2018).

En un piso térmico como el de la Ciudad de Pamplona (Colombia), se pudo apreciar que la temperatura del agua al interior del colector nunca descendió por debajo de los 25 ° C así la temperatura ambiente llegara a tener valores de un digito.

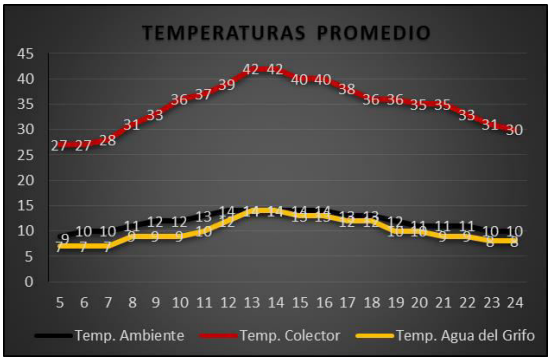
$$G.T = Tsc - Tag$$

Ecuación 6. Calculo del gradiente de temperaturas. (Espinosa, 2018)

Donde:
G.T = Gradiente de temperatura.
Tsc = Temperatura del agua a la salida de colector.
Tag = Temperatura del agua del grifo.

Los datos promediados se pueden apreciar en la figura 7 que muestra la temperatura del agua del colector vs la hora del día.

Figura 11. Temperaturas promedio en el colector.



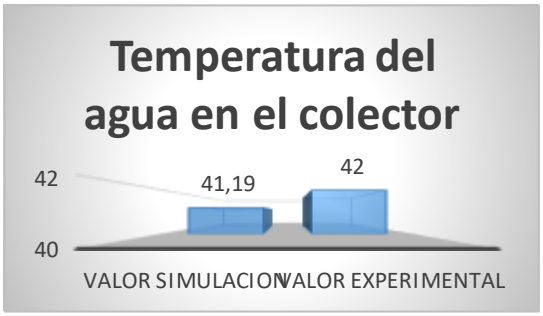
(Espinosa, 2018 Vol. 39 (Nº 13))

5. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Observando la simulación se puede ver que el valor mínimo de temperatura del agua dentro del colector es de 41.19 ° C y se encuentra en la parte central de la cámara justo donde está ubicada la válvula de salida de agua caliente, siendo prácticamente el mismo valor de 42 ° C de temperatura promedio a

la salida del agua caliente que se determinó de forma experimental.

Figura 12. Temperatura de agua a la salida del colector.



(Espinosa, 2018 Vol. 39 (Nº 13))

Como se puede aprecia en la Figura 12 la diferencia de temperatura entre la simulación y el dato experimental es de 0.81°C. Validando los datos que se recolectaron de manera experimental y también la viabilidad del diseño del colector térmico solar hechos con neumáticos desechados como una alternativa a los sistemas convencionales de calentamiento de agua sanitaria para aplicaciones domésticas.

6. CONCLUSIONES

Se demostró que la configuración del software de elementos finitos es correcta para el tipo de problema que se presenta.

Los resultados obtenidos en la simulación fueron validados mediante el proceso experimental obteniendo una variación de temperatura de 0.81°C entre ambos métodos.

Se determinó que los neumáticos usados en el estudio cumplen las condiciones mínimas y en algunos casos sobrepasan las especificaciones necesarias para ser usados como colectores solares térmicos y recipientes de almacenamiento de agua caliente sanitaria.

El sistema de captura de datos permite realizar seguimiento permanente al prototipo, lo que facilita un estudio a largo plazo.

La eficiencia térmica del colector tuvo un valor de de 43.72% para las condiciones específicas del prototipo que se construyó y analizo.

Al observar el comportamiento del colector térmico solar hecho con neumáticos usados y comparándolo con otros sistemas de colectores solares que usan materiales reciclados se puede apreciar un comportamiento muy similar en los valores de temperaturas y eficiencia térmica obtenidos.

La prueba se realizó usando un neumático que brinda una capacidad de 36.72 litros, al ser necesario el incremento del volumen de agua es posible conectar cualquier cantidad de neumáticos para brindar la capacidad requerida.

REFERENCIAS

ENERGIA-UPME, M. D. (2016). *Atlas de Radiacion Solar de Colombia.* Bogota D.C.

Rodriguez, L. A. (2015). Diseño de un colector solar de placa plana. *Ingeniería Energética,*, 15-24.

Espinosa, E. A. (2018 Vol. 39 (Nº 13)). Diseño de un colector térmico solar a partir de neumáticos usados para el calentamiento de agua sanitaria en aplicaciones domésticas.). *ESPACIOS*, 22-28.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, ICONTEC. (2003). *GUÍA DE ESPECIFICACIONES DE SISTEMAS ANC-0603-13-01.* Bogota D.C.

SITIOS WEB

ingenieriaycalculos.com. (2010-2017). *ingenieriaycalculos.com*. Recuperado el 5 de 8 de 2017, de https://www.ingenieriaycalculos.com/matematicas/geometria/figuras3d/calculadora/toroide

TIRE RACK. (20 de 11 de 2017). *TIRERACK.COM*. Obtenido de https://blog.tirerack.com/blog/hunters-ramblings/what-tire-pressure-should-i-be-using

COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN CFD EN EL ESTUDIO DEL EFECTO VÓRTICE SOBRE PUNTA DE ASPA PARA ROTOR EÓLICO

COMPARISON OF CFD SIMULATION TOOLS IN THE STUDY OF VORTEX EFFECT ON WIND ROTOR BLADE TIP

Tatiana Ortegon Sarmiento[*], William Gomez Rivera[**], Hernan Cerón Muñoz[***]

[*] **Universidad Militar Nueva Granada,** Faculty of Engineering, Research Group VOLTA-GMCDP.
Bogota D.C, Colombia.
Phone: (+57 1) 650 0000 ext:1280.
E-mail: [*]taxipiorsa@hotmail.com, [**]william.gomezr@unimilitar.edu.co.
[***] **Universidade de São Paulo,** Escola de Engenharia de São Carlos.
São Carlos, Brazil.
Phone: (+55 16) 3373 8347.
E-mail: hernan@sc.usp.br.

Resumen: Actualmente existen diversas herramientas para la simulación del comportamiento dinámico de los fluidos, muchas de las cuales son comerciales o de código abierto. Ansys y OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) son algunas de ellas, sin embargo, existen marcadas diferencias durante las etapas de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento. A fin de analizar las ventajas y desventajas que estos dos códigos ofrecen, así como las diferencias en resultados, en este trabajo se analizó específicamente el efecto de vórtice que se crea sobre la punta de un aspa para rotor eólico. Para el caso específico se realizó un análisis 3D de un aspa con cuerda variable y perfiles NREL-S811, NREL- S809 y NREL-S810 (desde la raíz hasta la punta). El análisis incluye el uso de una punta base (sin modificación), y una tipo Tip-Tank, y la comparación de los coeficientes aerodinámicos (C_L, C_D y C_M) y los vórtices generados sobre cada una de estas. Para el estudio se utilizó el modelo de turbulencia k-epsilon, y Reynolds Re=1.44x10^{-5}. Se evidenció que tanto en Ansys como en OpenFOAM, la intensidad del vórtice obtenido varía dependiendo de múltiples factores como tamaño del elemento, así como del modelo de turbulencia. Con los resultados obtenidos se evidenció para el caso de OpenFOAM que la punta Tip Tank presentó un coeficiente de sustentación mayor en un 22.9% respecto a la punta base, y un coeficiente de arrastre mayor en un 3.74%, mientras que para el caso de Ansys, la punta Tip Tank presentó un coeficiente de sustentación mayor en un 0.25% respecto a la punta base, y un coeficiente de arrastre mayor en un 3.14%. La utilización de OpenFOAM requiere de un acertado conocimiento de las variables de flujo y de la aerodinámica del caso bajo estudio, toda vez que al tratarse de un código basado en programación C++, el usuario puede incurrir en errores que no son evidentes y afectan sensiblemente el comportamiento teórico del modelo aerodinámico. Por el contrario, ANSYS es más amigable en cuanto al análisis, sin embargo, es poco flexible en la modificación de las variables base.

Palabras clave: CFD, energía eólica, ansys, openFOAM, vórtice.

Abstract: At present there are several tools for simulating the dynamic behavior of fluids, many of these are commercial or open source. Ansys and OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) are some of them, however, there are marked differences during the pre-processing, processing, and post-processing stages. In order to analyze the advantages and disadvantages that these two codes offer, as well as the differences in results, in this paper we specifically analyzed the vortex effect that is created on the tip of a wind rotor blade. For the specific case, a 3D analysis of a blade with variable chord and profiles NREL-S811, NREL- S809 y NREL-S810 (from root to tip) was performed. The analysis includes the use of a base tip (without modification) and a Tip Tank type, and the comparison of the aerodynamic coefficients (C_L, C_D and C_M) and the vortices generated on each of these. For the study we used the k-epsilon turbulence model and Reynolds $Re=1.44x10^{-5}$. We evidenced that in both Ansys and OpenFOAM, the intensity of the vortex obtained varies depending on multiple factors such as size of the element, as well as the turbulence model. With the results obtained, it was evident for the case of OpenFOAM that the Tip Tank presented a lift coefficient higher by 22.9% with respect to the base tip, and a drag coefficient greater by 3.74%, while in the case of Ansys, the tip tank device had a lift coefficient higher by 0.25% with respect to the base tip, and a greater drag coefficient by 3.14%. The use of OpenFOAM requires an accurate knowledge of the flow variables and the aerodynamics of the case under study, since being a code based on C++ programming, the user can commit errors that are not evident and significantly affect the theoretical behavior of the aerodynamic model. In contrast, Ansys is more user-friendly in terms of analysis, however, it is less flexible in the modification of the base variables.

Keywords: CFD, wind power, ansys, openFOAM, vortex.

1. INTRODUCCIÓN

Over the years, wind energy has gained great strength as an alternative source to the use of fossil fuels to obtain energy in a cleaner and more efficient way. Many people are currently working on the development of new aerodynamic designs of wind turbines to improve the aerodynamics of these to achieve the highest efficiency possible and maximize the energy conversion capacity at the lowest cost (Ali *et al.,* 2015). The aerodynamic efficiency of wind turbines depends on the aerodynamic design of the blades, their dimensions, construction material and the angle of attack (Raj *et al.*, 2016). With a good aerodynamic design of the blades we can obtain improvements in the efficiency of the turbines, however, there are aerodynamic losses that affect the extraction capacity and energy generation of these, such is the case of the losses related to the vortices generated at the tips of the blades due to the difference in pressure between the intrados and the extrados (Ali *et al.*, 2015), this type of loss is caused by the induced drag, associated with the lift force and with its dependence on the angle of attack (Sadraey, 2009). Losses are also caused by the skin friction drag, this is the aerodynamic resistance caused by the contact of a fluid with the surface of a body, in this case the contact with the surface of the blades (UVU aviation, 2013). The skin friction drag depends on the viscosity of the air and occurs in the boundary layer when the airflow around an object is altered by surface imperfections. Rough surfaces speed up the transition from laminar to turbulent flow of the boundary layer airflow (UVU aviation, 2013; SKYbrary, 2017).

The vortices generated at the wind rotor blade tips have been studied in many opportunities with most of these investigations focused on computational fluid dynamics (CFD). Simulation tools such as Ansys and OpenFOAM allow the analysis of fluid behavior and the solution of problems related to the dynamics of solids and electromagnetism (ESI Group, 2011).

OpenFOAM is an open source software that allows to solve Computational Fluid Dynamics and Continuum Mechanics applications (Rivera and Furlinger, 2011). This tool uses the Finite Volume Method for the solution of partial differential equations using the laws of conservation (mass, momentum and energy) in the form of integral equations (Mara *et al.*, 2014). OpenFOAM has different libraries that provide efficiency in the solution of fluid dynamics problems, including mesh, parallelization and various turbulence models for incompressible and compressible flows (Rivera and Furlinger, 2011). In addition to this and considering that the software is a collection of C++ code, it offers flexibility by allowing the user to modify and create their own libraries and solvers, however, it has limited documentation and references (Lysenko *et al.*, 2013).

Ansys, on the other hand, is a high-performance commercial CFD tool that includes different simulation packages, notably CFX. This package is used for the simulation of processes with fluids, or with heat transfer, being of great precision, speed and robustness in the analysis of rotating machinery (ANSYS, Inc., 2018). Like OpenFOAM, Ansys CFX supports the finite volume method (Mara *et al.*, 2014).

In this paper we analyze the aerodynamic performance of two different tip devices of wind turbine blade with variable chord, a tip device without modifications, and one type Tip-Tank, by determining and comparing the lift, drag and moment aerodynamic coefficients (C_L, C_D and C_M), as well as the generated vortices, using simulation tools in CFD. The above, with the aim of analyzing the results in both Ansys and OpenFOAM, to understand the advantages and disadvantages offered by these two tools.

This article is organized as follows: Section 2 presents the design of the wind turbine blades, and the simulation of the tip devices. Section 3 presents the results obtained in the simulations and the analysis of the aerodynamic coefficients and the vortices generated on each of the tips. Finally, in section 4 we present the conclusions.

2. DEVELOPMENT

For the comparison of the Ansys and OpenFOAM simulation tools, the vortex effect generated on the wind rotor blade tip was chosen as the case study, for which the blade design was carried out, selecting the aerodynamic profiles, followed by their 3D modeling, and their subsequent CFD simulation. Each of these items will be described in detail below.

2.1 Wind rotor blade design

The variable chord blades are characterized by a low drag coefficient. These are constructed from different airfoils whose inclination results in torsion and therefore low intensity vortices at the tip (Lysen, 1983). The aerodynamic profiles of the blade were selected so that it is functional and strong. For the selection of the aerodynamic profile of the blade root we considered an airfoil capable of resisting efforts and allowing a good mechanical coupling to the rotor, thus choosing the NREL-S811 airfoil. For the blade body the NREL-S809 airfoil was selected to ensure a high lift and torque coefficient. The airfoil of the blade tip was selected so that there is a certain symmetry between the intrados and the extrados, and that the airfoil allows to incorporate a system of interchangeable tips, thus using the NREL-S810. The distribution of the airfoils along the span of the blade selected for this analysis is shown in Fig. 1.

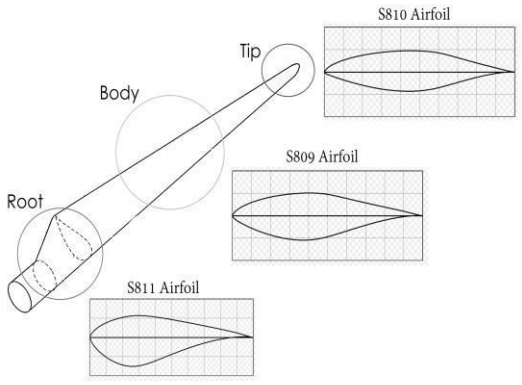


Fig. 1. Distribution of the aerodynamic profiles on the selected variable chord blade. Source:(Jonkman, 2014; Patente nº US20120269640A1, 2012)

The blade has a length of 0.7m, and a chord of 0.0816m.

Tip Tank devices are characterized by their rounded geometric shape, which allows to take advantage of the generated vortex phenomenon (Sport Aviation, 1971). These devices are used in aviation for fuel storage, however, when they are empty they move the pressure center outwards, reducing the induced drag and increasing the lift at the tips and bending stresses on the wing (Professional Pilots, 2002).

For the selected design, the blade tip corresponds to the final 10% of the total span of the blade, as shown in Fig. 2.

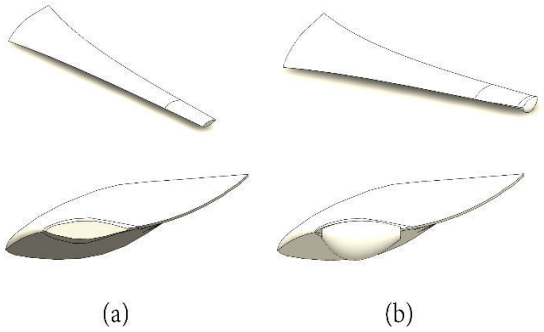


Fig. 2. (a) Blade with base tip (no modification), (b) blade with Tip Tank device

2.1 Simulation

To determine the lift and drag forces and the moment exerted on the blades under study, the simulation was performed using a rectangular domain whose size was established in such a way that it wouldn't affect the results due to parasitic turbulence or losses in the resolution of the velocity contours, thus selecting a size of 24.5 times the chord in each of the axes of the coordinated system.
The airflow velocity was set at 30 m/s with an air density of 1.087 kg/m^3 and a dynamic viscosity of 1.85x10^{-5} kg/m*s, obtaining a Reynolds number equal to Re=1.44x10^{-5}, as we presented in the Table 1.

Table 1: Simulation parameters

	Values
ρ = Air density (kg/m^3)	1.0879
T = Temperature (°C)	20
Patm= Atmospheric pressure (Pa)	92600
V = Wind speed (m/s)	30
Re = Reynolds number	144000
Blade length (m)	0.7
Cm = Chord (m)	0.0816
η = Dynamic viscosity (kg/m*s)	1.85x10^{-5}
S = Projected blade area (m^2)	0.03822
Ma = Mach number	0.087

The blades were simulated over a series of angles of attack α from -10° to 25° with increments of 1°, for this, the blade was left in its initial position varying the direction of the fluid, as shown in Fig. 3.

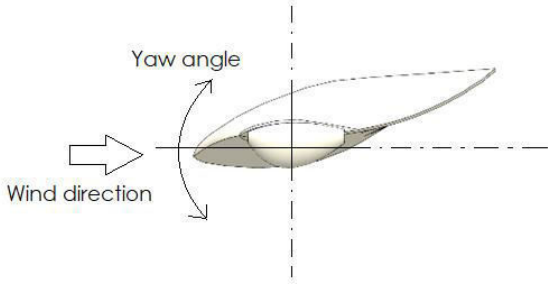


Fig. 3. Yaw angle setting. The position is shown for α =0°

The steady-state solver for incompressible turbulent flow was selected based on the Mach number obtained Ma = 0.087.

For the simulation of the different tip devices it is necessary to build a mesh, for which we used the software package ANSYS ICEM CFD to generate it, and then to use the mesh in openFOAM we imported it into the open source software using the external and open source software Salome Meca together with the script developed by Nicolas Edh (Edh, 2017). For the meshes made, a maximum element size of 0.1 m for the whole domain and a maximum element size of 0.001 m for the blade were defined. In addition, and to refine the mesh around the blade for a better analysis of the behavior of the wake or turbulence, a subdomain was created with a maximum element size of

0.01m. In Fig. 4 the domain and the subdomain mesh are presented. The height, length and width of the domain correspond to 24.5 times the chord of airfoil.

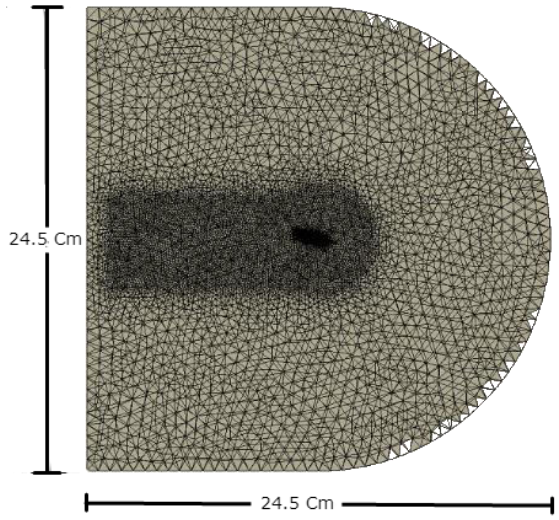


Fig. 4. Meshed domain of tip devices

For the simulations we used the k-epsilon (k-ε) turbulence model, which is one of the most used in computational fluid dynamics due to its capacity to model recirculation flows (Lopez and Muñoz, 2004).

Table 2: k-epsilon turbulence model configuration

	Values
I = Turbulence intensity	0.0362528
k (m^2/s^2)	1.77426
Epsilon (m^2/s^3)	67.8547886

Table 2 presents the configuration parameters of this model, these were calculated using equations (1), (2) and (3).

$$I = 0.16Re^{-1/8} \quad (1)$$

$$k = \frac{3}{2}(V * I)^2 \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{0.164k^{1.5}}{0.07Cm} \quad (3)$$

3. RESULTS

The vortices generated at the wind rotor blade tips were identified by creating velocity contour planes located 0.05m from the first chord quarter of the blade. In Fig. 5 the vortices produced on the different tips are displayed, showing that in both Ansys and OpenFOAM the Tip Tank device has a larger vortex diameter than the base tip.

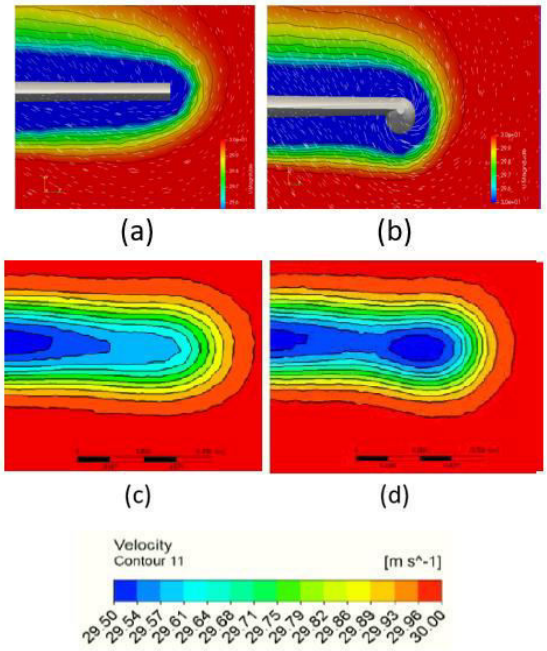


Fig. 5. Vortices generated in tip devices (a) base tip in OpenFOAM (b) Tip Tank in OpenFOAM (c) base tip in Ansys (d) Tip Tank in Ansys

The Table 3 shows the diameters of the vortices generated on the different analyzed tip devices.

Table 3: Vortices generated on the different analyzed tip devices

	Vortex diameter OpenFOAM (m)	Vortex diameter Ansys (m)
Base Tip	0.0156	0.010
Tip Tank	0.0234	0.020

The aerodynamic coefficients of lift C_L and drag C_D were obtained from the forces generated on the blade surface in the X and Y (Fx, Fy) direction for each angle of attack α. From these forces the drag

F_D and lift F_L forces were obtained respectively, as shown in Fig. 6.

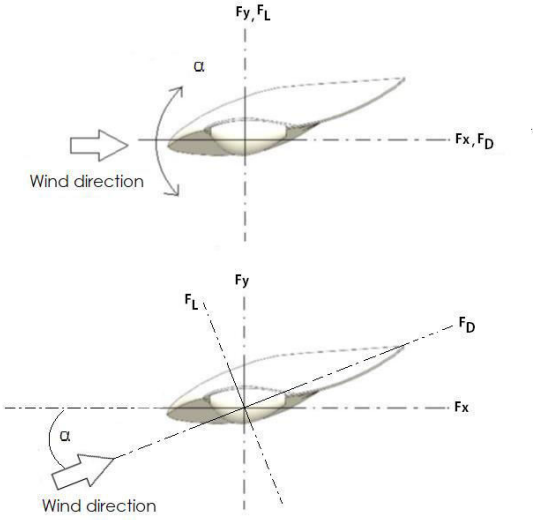


Fig. 6. Configuration of the forces on the blade surface

Due to the variation of the fluid direction in the simulations, the values of the resulting forces are adjusted so that the drag force is in the fluid direction and the lift force is perpendicular to it, as in Fig. 6. To do this, equations (4) and (5) were used to calculate the aerodynamic forces, and equations (6) and (7) (Lysen, 1983) were used to calculate the aerodynamic coefficients, where S is the projected area of the blade, ρ the air density, and V the wind velocity.

$$FL = Fycos(\alpha) - Fxsin(\alpha) \quad (4)$$

$$FD = Fxcos(\alpha) + Fysin(\alpha) \quad (5)$$

$$CL = \frac{FL}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (6)$$

$$CD = \frac{FD}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} \quad (7)$$

In Fig. 7 the lift coefficients of the different tips analyzed are presented at different angles of attack, showing that increasing this angle increases the lift to a certain point where it stalls. We noted that for the base tip the stall is presented from an angle of attack greater that 21° in the case of openFOAM, while in ansys it was for an angle of attack greater than 19°.

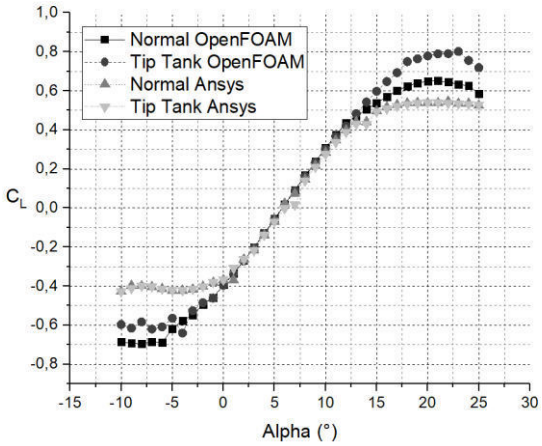


Fig. 7. Lift coefficient vs alpha

For the Tip Tank device, the stall is presented from an angle of attack greater that 23° in the case of openFOAM, while in ansys it was for an angle of attack greater than 20°, as we present on the Table 4.

Table 4: Angle at which devices stall

	Stall angle of attack °	Lift Coefficient
Base Tip OpenFOAM	21	0.65168
Tip Tank OpenFOAM	23	0.80088
Base Tip Ansys	19	0.53957
Tip Tank Ansys	20	0.54091

Likewise, it is evident that the lift coefficient has a linear behaviour for the angles of attack between -1° and 13°. It is observed that for the different devices the curve changes the inclination from a certain angle where the growth rate of the lift coefficient begins to decrease (Silva *et al.*, 2014).

The Table 5 shows the lift coefficients obtained for the different tips at angles of attack equal to 10°

and 15°. In these angles the highest lift to drag ratio was presented.

Table 5: Lift coefficients for angles of attack α=10°, 15°

	C_L (α =10°)	%	C_L (α =15°)	%
Base Tip OpenFOAM	0.3070	0	0.65168	0
Tip Tank OpenFOAM	0.3012	-1.92	0.80088	11.1
Base Tip Ansys	0.2852	0	0.4981	0
Tip Tank Ansys	0.2759	-3.26	0.4932	-0.984

In the Fig. 8 the drag coefficients of the different tip devices obtained with OpenFOAM are presented, showing an increase in the coefficients from the angle of attack α = 7°.

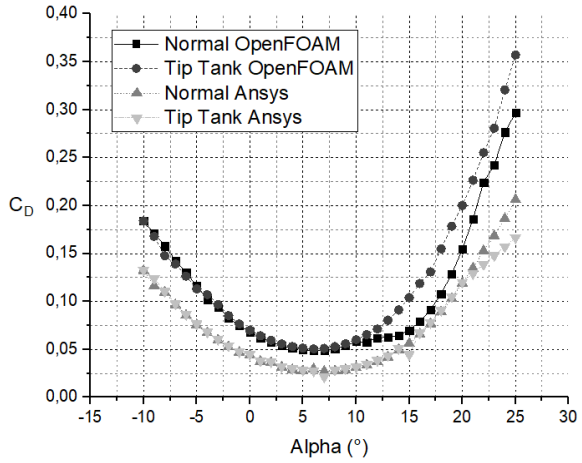


Fig. 8. Drag coefficient vs alpha

The Table 6 shows the drag coefficients obtained for the different devices at angles of attack equal to 10° and 15°, showing that for α=10° in both Ansys and OpenFOAM, the Tip Tank device presented a drag coefficient greater than the base tip.

For α=15°, the Tip Tank had a higher drag coefficient than the base tip, unlike Ansys, where the base tip had a higher drag coefficient than the Tip Tank.

Table 6: Drag coefficients for angles of attack α=10°, 15°

	C_D (α =10°)	%	C_D (α =15°)	%
Base Tip OpenFOAM	0.0581	0	0.65168	0
Tip Tank OpenFOAM	0.0601	3.44	0.80088	22.89
Base Tip Ansys	0.0308	0	0.0562	0
Tip Tank Ansys	0.0317	2.92	0.0446	-20.64

To determine the aerodynamic performance of the tips considered for the analysis, the lift to drag ratio was calculated and plotted based on the angle of attack α, as shown in Fig. 9.

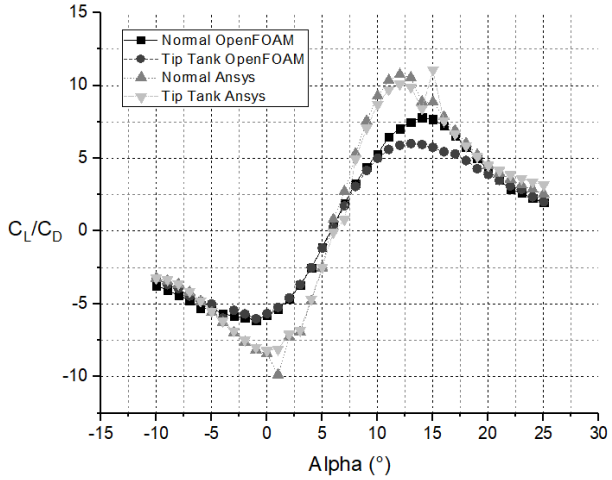


Fig. 9. Lift to drag ratio vs alpha

The ratio between aerodynamic coefficients C_L/C_D allows to appreciate the value of the angle of attack in which a better aerodynamic performance is presented.

Table 7 presents the maximum Lift to Drag Ratio of each tip device and its relation to the base tip.

Table 7: Maximum Lift to Drag Ratio of each tip device

	C_L/C_D	Angle of Attack	%
Base Tip OpenFOAM	7.794	14°	0
Tip Tank OpenFOAM	6.013	13°	-22.85
Base Tip Ansys	10.749	12°	0
Tip Tank Ansys	10.086	12°	-6.168

We observe that the base tip, the one that has no modification, presented the highest ratio in both Ansys and OpenFOAM.

The graph of the coefficient of moment allows to determine the dynamics of the airfoil on its rotation and the stable positions (Schnaidt, 2006). As shown in Fig. 10, as the angle of attack increases, the coefficient of moment increases slightly to a point where it decreases drastically, being negative.

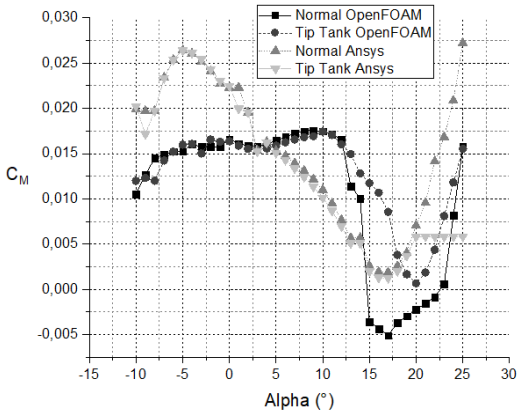


Fig. 10. Coefficient of moment vs alpha

When the trend line of the different curves of the moment coefficient for each tip device is obtained, it is observed that they have a negative slope. This allows us to conclude that the blade with the different tip devices has a stabilizing behavior (Silva *et al.*, 2014), that is, it is capable of restoring equilibrium to any disturbance that causes a change in the angle of attack (García Rivero, 2010).

4. CONCLUSIONES

Regarding the obtained coefficients, the studies carried out allow us to conclude that for the case of OpenFOAM the Tip Tank presented a lift coefficient higher by 22.9% with respect to the base tip, and a drag coefficient greater by 3.74%, while in the case of Ansys, the tip tank device had a lift coefficient higher by 0.25% with respect to the base tip, and a greater drag coefficient by 3.14%.

The use of OpenFOAM requires an accurate knowledge of the flow variables and the aerodynamics of the case under study, since being a code based on C++ programming, the user can commit errors that are not evident and significantly affect the theoretical behavior of the aerodynamic model. In contrast, Ansys is more user-friendly in terms of analysis, however, it is less flexible in the modification of the base variables.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Universidad Militar Nueva Granada (UMNG) for the support provided for the development of this work, which was carried out as part of the high-impact project IMP ING 2137 entitled "Development of microturbine to take advantage of the vortex effect in wind rotor blade tip", 2016-2018, and to the Universidade de São Paulo (USP) for their collaboration and assistance.

REFERENCES

ESI Group. (2011). *CONSULTING SERVICES WITH OpenFOAM®.* Paris: ESI Group. Obtenido de https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/brochure_flyer/1096/flyer_cfd_consulting-services_openfoam_lores.pdf

Ali, A., Chowdhury, H., Loganathan, B., & Alam, F. (2015). An Aerodynamic Study of a Domestic Scale Horizontal Axis Wind Turbine With Varied Tip Configurations. *Procedia Engineering*, 757-762.

ANSYS, Inc. (2018). *ANSYS CFX*. Obtenido de ANSYS: http://www.ansys.com/es-ES/Products/Fluids/ANSYS-CFX

Edh, N. (2017). *salomeToOpenFOAM*. Obtenido de https://github.com/nicolasedh/salomeToOpenFOAM

Enevoldsen, P. B., Kristensen, J. J., & Thrue, C. (25 de October de 2012). *Patente nº*

US20120269640A1. Obtenido de https://patents.google.com/patent/US20120269640A1/en

García Rivero, M. (2010). ESTABILIDAD Y CONTROL. En *Diseño de un UAV ligero de propulsión eléctrica para monitorización medioambiental* (págs. 99-118).

Jonkman, B. (2014). *NREL's S-Series Airfoils.* Estados Unidos: National Renewable energy laboratory.

Lopez, L., & Muñoz, J. L. (2004). Estudio de la turbulencia a través del modelo k-épsilon, mediante un código tridimensional con esquelas de alto orden. *Información Tecnológica, 15*, 25-28.

Lysen, E. H. (1983). *Introduction to Wind Energy: Basic and advanced introduction to wind energy with emphasis on water pumping windmills.* CWD Consultancy services wind energy developing countries.

Lysenko, D. A., Ertesvåg, I. S., & Rian, K. E. (2013). Modeling of turbulent separated flows using OpenFOAM. *Computers & Fluids, 80*, 408-422.

Mara, B. K., Mercado, B. C., Mercado, L. A., Pascual, J. M., & Lopez, N. S. (2014). Development and validation of a CFD model using ANSYS CFX for aerodynamics simulation of Magnus wind rotor blades. *2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM).* Palawan: IEEE.

Professional Pilots. (2002). *Tip Tanks, pro's and con's*. Obtenido de PPRuNe: http://www.pprune.org/tech-log/62967-tip-tanks-pro-s-con-s.html

Raj, A., Gurav, R., Sankpal, J., Chavan, D., & Karandikar, P. (2016). Study of output parameters of horizontal axis wind turbines using experimental test setup. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)* (págs. 1-6). Delhi: IEEE.

Rivera, O., & Furlinger, K. (2011). Parallel Aspects of OpenFOAM with Large Eddy Simulations. *2011 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications.* Banff, AB, Canada: IEEE.

Sadraey, M. (2009). Drag Force and Drag Coefficient. En M. Sadraey, *Aircraft Performance Analysis.* VDM Verlag Dr. Müller.

Schnaidt, M. T. (2006). *Coeficientes Aerodinamicos Cl Cd Cm con un aprofondimiento de Cm al respecto de la estabilidad de vuelo* . Santiago, Chile: Universidad Andres Bello .

Silva, N., Pedraza, N., Cerón, H., & Téllez, A. (2014). Análisis Aerodinámico Computacional y Experimental para el Ala de un Mini Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT). *VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica* . Uberlândia - MG - Brasil.

SKYbrary. (27 de July de 2017). *Friction Drag.* Obtenido de SKYbrary: https://www.skybrary.aero/index.php/Friction_Drag

Sport Aviation. (1971). *Comparison of Square, Round, and Hoerner Wing Tips.* Sport Aviation.

UVU aviation. (20 de December de 2013). *Skin Friction Drag.* Obtenido de YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=NjX2jL-LrkI

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

Evaluación Aerodinámica mediante CFD de Dispositivos en Punta de Aspa para Turbina Eólica

AERODYNAMIC EVALUATION WITH CFD OF TIP DEVICES IN BLADE FOR WIND TURBINE

Héctor Parra Peñuela[*], William Gómez Rivera[**], Hernán Cerón[***]

*. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá,Colombia, guillerhec@gmail.com
**. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, william.gomezr@unimilitar.edu.co
***. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, hdceron@gmail.com

Resumen: La región de la punta en las aspa de un rotor eólico se presenta el fenómeno de arrastre inducido, el cual disminuye la eficiencia aerodinámica de la turbina e incrementa los esfuerzos sobre la estructura. En este trabajo, se analizan computacionalmente (CFD) diferentes dispositivos de punta de aspa, con base en aplicaciones similares como Winglets, Split-Tips, Tip-Tanks, como alternativa de mejora de la aerodinámica. El Reynolds utilizado fue de Re =140000 y modelo RANS de turbulencia K-e, el ángulo de ataque (alfa) fue variado desde -25° hasta 25°. El análisis de los resultados mostró, respecto al aspa con punta base (sin modificación), incremento porcentual del coeficiente de sustentación (CL) así: Split-Tips= 3% Winglet = 4.6%, la punta tipo Tip-Tank no presentó mejora apreciable, La intensidad del vórtice de punta de aspa también mostró relación directa (incremento/disminución) cuando fue comparado con la variación del CD.

Palabras clave: CFD, Vortices, Winglets, HAWT.

Abstract: The region of the tip in the blades of a wind rotor presents the phenomenon of induced drag, which decreases the aerodynamic efficiency of the turbine and increases the stresses on the structure. In this work, different tip devices are computationally analyzed (CFD), based on similar applications as Winglets, Split-Tips, Tip-Tanks, as an alternative to improving aerodynamics. The Reynolds used was of Re = 140000 and model RANS of turbulence K-ε, the angle of attack (alpha) was varied from -25 ° to 25 °. The analysis of the results showed, with respect to the blade with base tip (without modification), percentage increase of the lift coefficient (CL) as follows: Split-Tips = 3.5% Winglet = 4.6%, tip Tip-Tank type did not present appreciable improvement The intensity of the tip tip vortex also showed a direct relationship (increase / decrease) when compared to the variation of the CD.

Keywords: CFD, Vortex, Winglets, HAWT.

1. INTRODUCTION

Wind generators are systems composed of 4 elements as they are; A wind rotor, an electric generator, the power control or regulation system and power transmission system. In this work, we will focus on the first, the wind rotor; this element is composed of several blades. At the tips of these blades, a phenomenon known as tip vortex is generated, many works currently seek to increase the energy efficiency of these systems through geometrical improvements, in our case, a research and verification process will be carried out by simulation in blades variable chord for a wind rotor, with modifications in its tips known in some cases as Winglets.The Winglets, are aerodynamic elements in a vertical angle to the extradorso of the wing of an aircraft, are installed at the ends in order to decrease the resistance and vortices that are produced by the pressure difference [1]. The addition of a Winglet, at the tip of the blades of the horizontal axis wind turbine rotor, can increase its power output. [2]. Some work describes that the Winglets, can improve the capacity of power production, observable with the increase of the tip speed ratio, causing a maximum power increase of approximately 3.96% [2]. In the blades of a wind rotor, the aerodynamic efficiency decreases as the viscous drag force increases, to evaluate the performance of aerodynamic systems, measurements of aerodynamic coefficients with wind tunnels are generally made, allowing to observe that the aerodynamic performance of the wind turbines it is significantly influenced by the unstable flow around the rotor blades. [3]

The vortices are phenomena generated by pressure changes, these are helical, and often occur in rotating mechanical systems that are immersed in a fluid, because it is a phenomenon to study it can generate new ideas on developments that help control At present, computational methods such as CFD, based on MEF (finite element methodology) are used to analyze unstable aerodynamic characteristics that affect performance in HAWT (Horizontal-axis Wind turbine). [3].

Colombia has a privileged coastal geographical position, which is why there are great sources of wind resources. The power to implement this type of renewable energy contributes and motivates the research and development of wind power plants with efficiency improvements, which would allow obtaining energy from non-polluting way, and with the aim of guaranteeing supply in ZNI (non-interconnected areas of the nation)

2. METHODOLOGY

In order to achieve a CFD Analysis of the effect of use of the alar tip devices, in wind rotor blades, it is decided to carry out several design and development phases, in order to give an order to the work to be done.

I. Exploration Phase
In this phase, we look for the most useful information or documentation, which allows us to carry out a CAD design development, of several types of tips for the blade and its respective simulation in CFD, which also allows us to learn about this type of measurements, in order to obtain results that allow to evaluate the aerodynamic performance, and thus generate coherent conclusions about the use of tip devices in wind rotor blades.

II. Mathematical Development and Design Phase
In this phase, the mathematical design will be carried out to allow the construction of a CAD, with a variable chord blade, using the design equations in an orderly manner. And so, generate the curves associated with the profiles, according to typical design parameters, which facilitate the creation of a 3D design and subsequent CAD design of tips or Winglets to be evaluated.

III. Simulation phase:
With the 3D design of the blades and their tips, it is analyzed by specialized tools of CFD such as ANSYS16®, the behavior of the vortices of a blade, with several tips, in this phase, it is important to highlight the analysis and appropriate selection of the type and size of the finite element, as well as the type of mesh on the surface of the blade, this is known as Pre-processing, obtaining a simulation consistent with the curves of aerodynamic coefficients.

3. DEVELOPMENT

Wind Rotors today, have several types of blades, which differ mainly by their geometry. These always seek the best possible aerodynamic performance, depending on their geographical location and atmospheric conditions, there are two types of basic blade construction structures such as; Fixed chord blade and Variable chord blade, these last are characterized by their low drag coefficient. This design has been studied extensively and is described in several design methodologies and books, for our case we use the equations of design of variable chord blades, described by Lysen [4].

Aerodynamic Coefficients:

One way to evaluate the performance of wing profiles, are the aerodynamic coefficients that can be predicted, measured or simulated generally as a function of the angle of attack Alpha (α), which are:

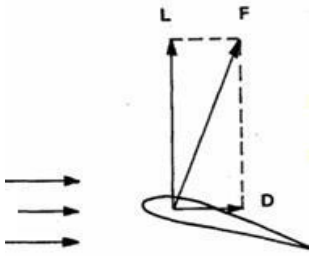


Figure 1: Force diagram for NACA wing profile, lift and drag forces. [4]

The aerodynamic coefficients are associated with the lift forces L, drag force D, and moment with respect to the quarter of chord M, as shown in equations (1), (2), (3).

$$c_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho * V^2 * A} \quad (1)$$

$$c_D = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho * V^2 * A} \quad (2)$$

$$C_{M_{AC}} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho * V^2 * A * Cm} \quad (3)$$

CAD Design of Blade

In order to provide better mechanical conditions, it is intended that this blade has 3 types of profile direction, that are mechanically compatible and that allow a functional and resistant blade, a profile of robust or thick appearance for the root of the blade, suitable to resist efforts and a good mechanical coupling to the rotor. Also another profile for the blade body, which guarantees a typical lift coefficient, and finally, a profile shape for the tip, which allows the location of a mechanical coupling system for interchangeable tips, with intra-and extra-dorsal symmetrical, to search for it in the databases of NREL (National Renewable Energy Laboratory) [5], the coordinates of the profiles, and selecting them such that their geometric differences are subtle.

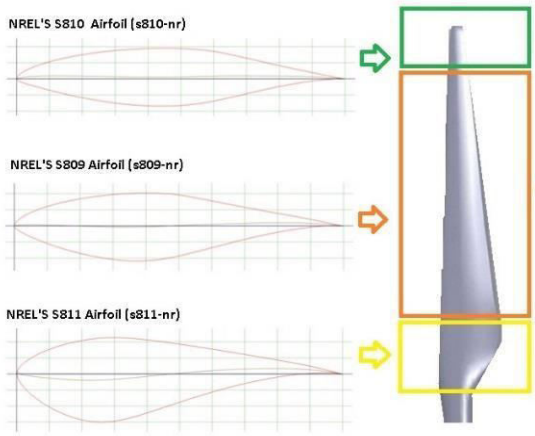


Figure 2: Diagram of selected wing profiles for variable chord blade design.

Once a previous investigation and search of studies on types of NACA and NREL profiles [5], figure 2, is performed by means of a predictor of aerodynamic coefficient curves known as Javafoil [6], the following aerodynamic coefficient curves, this with In order to evaluate the coupling capacity of these profiles, be part of a single blade and see that αd design attack angle use.

Reynolds Number

To make a prediction of the aerodynamic coefficients, the calculation of the associated Reynolds number is carried out, in order to configure the simulation in Javafoil.

$$Re = \frac{V\ Cm\ \rho}{\eta} \quad (4)$$

Table 1. Reynolds Number calculation.

ρ (kg/m3)	Cm (m)	η N·s /m^2	V (m/s)	Re
1.087	0.081	1.85 x10^{-5}	30	140000

As it is a subsonic aerodynamic application, a wind speed of 30 m/s is used, in order to be able to develop future experimental tests in a real wind tunnel, which allow to evaluate the simulation results obtained with CFD.

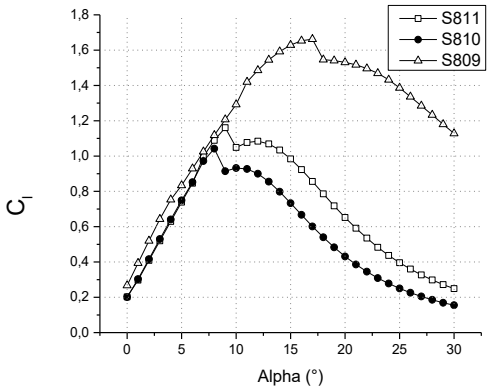


Figure 3: Lift Coefficient for NREL profiles S809, S810, S811 using the JavaFoil® predictor for a Reynolds number = 140000.

The curves obtained by the Javafoil® predictor software, shows that these profiles have a similar behavior for Alpha (α) attack angles between 0 ° and 7 °.

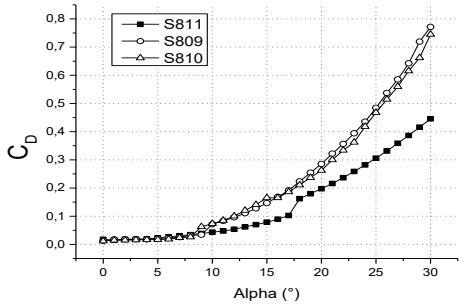


Figure 4: Drag coefficient for NREL profiles S809, S810, S811 using the JavaFoil predictor for a Reynolds number = 140000.

The predictor shows quite distant values between the moment coefficient associated with the S811 profile, with respect to the other profiles (S809 and S810), which indicates a relatively similar behavior for angles between 0 ° and 5 °, therefore decides to take an Alpha Design Angle in this interval with a value of αd = 5.5, with an associated design lift coefficient of Cld = 0.795.

We start from the limitation that the radius of the blade can not be more than 1 m, so it is desired to perform future tests in a real wind tunnel, which has 2 m in height, also that the associated electric generator to use It has blades of a similar size, close to 1 m radius, so the equations related to the calculation of the energy and radius of the wind rotor described in [4], will not be taken into account for this part of the study, since from there the radius of the blade to be constructed was defined according to the required energy.

Once a radius of 700 mm is defined, a table of equations is made, where we can obtain the value of the chord and the angle of inclination of each profile, which are calculated according to the Total radius, with the use of some constants recommended by some authors, associated with the type of NREL profile, as for example in the case of a TSR or λd in the book of HD Lysen recommends for these types of profiles an λd = 6 with a number of blades or B = 3, we would have:

$$R = 700\,mm \tag{5}$$

$$\lambda_{rd} = \lambda_d \frac{r}{R} \tag{6}$$

$$\phi = \frac{2}{3}\tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_{rd}}\right) \tag{7}$$

$$\beta = \phi - a_d \tag{8}$$

Once the profiles of the blade are created from the design equations described, the CAD design of the blade is created, this with the aim of generating a solid, from the union of the sketches.

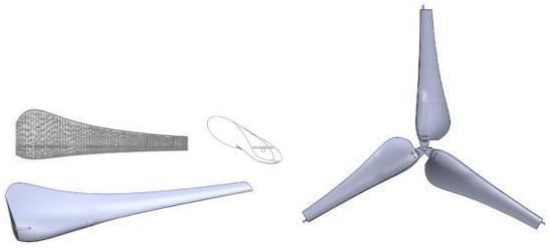


Figure 5. CAD design of the variable winding blade by importing the coordinate values of profiles.

Design of Tips

Once several types of tips have been analyzed in previous studies (Figure 6), it is possible to appreciate that several of the study points to design must have geometric characteristics that generate useful vortices, but that do not damage the operation of the blade, that is to say that instead of damaging its aerodynamic behavior, allow an advantage of the vortex phenomenon, this without significantly increasing the induced drag. Below are several tip geometries, which were used as design cues [7].

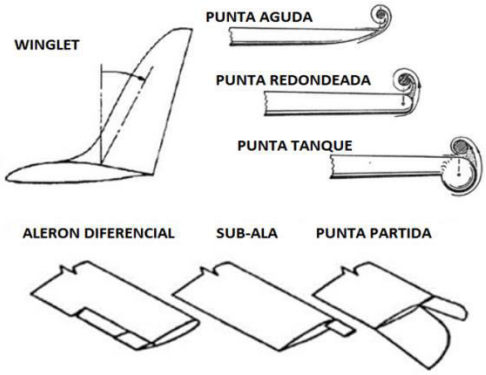


Figure 6. Forms of tips for wings of aircraft and helicopter rotors, and typical behavior of pointed vortices [7].

In Figure 7, there are several types of tips for wings of aircraft and blades of helicopters, among which stand out the split ends types Split, rounded, straight, and type Winglet.

Real Applications

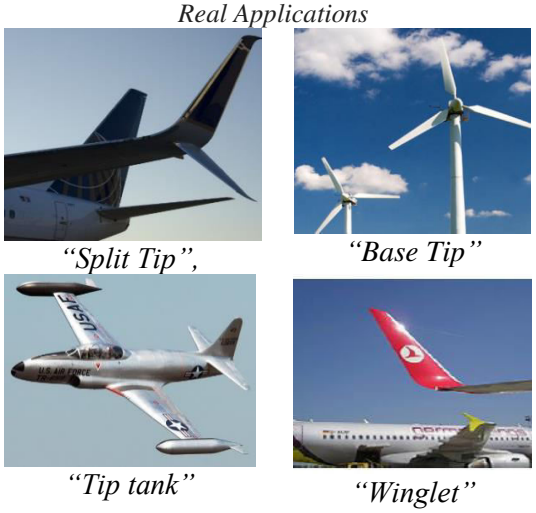


Figure 7. Forms of tips for wings of aircraft and wind turbines [7]

Therefore, the idea of developing 5 representative Tips of these forms, which occupy 3% of the final distance of the tip of the blade as shown below (Figure 8).

- **Tip 1**, Tip "Split-tip" 1: This tip, is characterized by a split point shape at 11.25 ° between sub-points. (Figure 8)
- **Tip 2**, Tip "Split-tip" 2: This tip has a split point shape with 22.5 ° between sub-points, and is characterized by starting its partition at the end of the base point. (Figure 8)
- **Tip 3**, Base Tip: This is characterized by presenting a normal tip shape without modification geometry; therefore it is defined as base tip. (Figure 8)
- **Tip 4**, tip "Tip-Tank": This tip has a rounded shape or bulb, is characterized by generating more circular vortices and is used as a storage tank for fuel in aerobatic aircraft hence its name. (Figure 8)
- **Tip 5**, Tip "Winglet": This tip is characterized by presenting an L shape at the end of the tip on wings of aircraft, it generally has angles of inclination between 45 ° to 90 °, it is also known to reduce the effect in a large percentage of tip vortex. (Figure 8)

Once the Tips to be evaluated have been defined, the following CAD designs of interchangeable tips for a variable winding blade for a wind rotor are obtained.

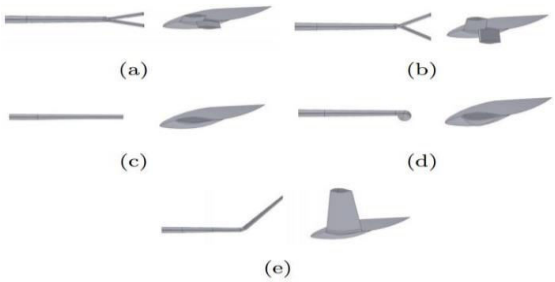


Figure 8. Designs of Tips: a) Tip type Split-tip with separation angle of 11,25º. b) Tip type Split-tip with separation angle of 22,5º. c) Base tip without modification d) Tip type Tip-tank. e) Tip type Winglet with angle of inclination of 45 º.

To achieve CFD simulation of the blade in a virtual wind tunnel, is necessary to use a specialized software that uses MEF (finite element method), capable of generating a dynamic fluid analysis, after a previous review of works of this type, it is decided to use ANSYS 16, with its Workbech and Solver CFX environment, (Figure 9). Which allows to quickly configure the simulation conditions as well as the turbulence models that in our case will be K-ε.

Mesh Convergence

In order to define the finite element size suitable for a CFD simulation, it is necessary to pre-simulate Figure, with several element sizes until a steady value can be seen in the lift coefficient values.

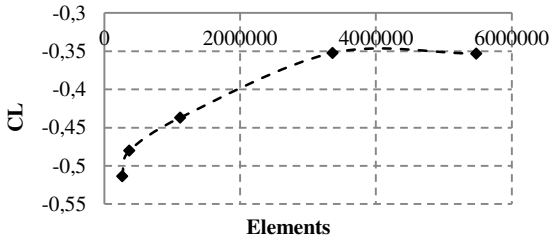


Figure 9. CL with α = 0 ° vs. numbers of elements in the surface of the blade.

For mesh with element size of 1 and 0.8 mm, it can be seen that the values of the CL (Figure 9), have a more stable value, so it is decided to use an element size on the blade surface of 1 mm. In order to obtain more precise simulation results, the mesh with body influence is performed, which allows locating smaller elements in selected areas of interest, such as in the vicinity of the blade, which increases the number of elements of $3.3X10^6$ to $5.8X10^6$ (Figure 10).

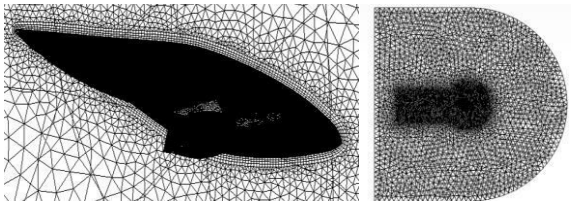


Figure 10. Mesh with inflation of 4 layers and element size of 1 mm on the surface of the blade.

The mesh of the domain (Figure 11), is one that surrounds the structure to analyze, it was necessary to find a way to build one in which you could see behavior in detail in the fluid in the vicinity of the cross and thus obtain normal forces, with an acceptable precision.

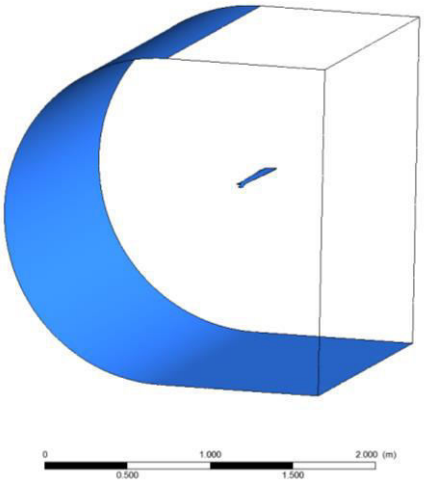


Figure 11. Simulation domain.

This 3D mesh (Figure 10), results after several attempts of meshing by means of ANSYS ICEM, obtaining the best results with the following parameters: Element = triangular, with Inflation from the surface of the blade, number of layers = 4, layer height = 1 mm, mesh option with body influence, achieving element sizes of 1 mm on the whole surface of the blade, 10 mm in the vicinity and 50 mm in the walls of the domain, creating a final mesh of blade with tip and domain of $6x10^6$

elements and $1.2x10^6$ nodes approximately, obtaining the following curves of aerodynamic coefficients, making the change of the direction of the fluid, emulating in this way the turn of the blade or angle of attack, with the speed components, in the configuration pchordrties of the INLET region.

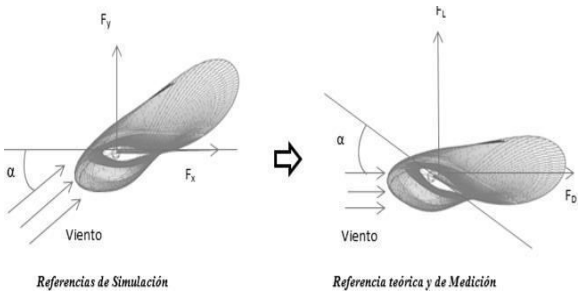


Figure 12. Reference of forces in Simulation and theory

In simulation, the blade remains static and the fluid changes its direction (Figure12), experimentally the fluid maintains the direction constant, and the blade varies the angle of attack, therefore the simulated values must be adjusted (9) and (10) to be able to be compared with future experimental works.

$$\boldsymbol{fL} = Fy\cos(\alpha) - Fx\,sen(\alpha) \tag{9}$$

$$\boldsymbol{fD} = Fy\,sen(\alpha) - Fx\cos(\alpha)$$

$$c_L = \frac{\boldsymbol{fL}}{\frac{1}{2}\rho * V^2 * A} \qquad c_D = \frac{\boldsymbol{fD}}{\frac{1}{2}\rho * V^2 * A} \tag{10}$$

4. RESULTS

The highest lift values are presented in the Split-tip of 45º Figure 9, with respect to the tip the base tip, a lower value is observed for positive angles, which indicates that all the simulated tip devices have an increase of sustentation with respect to the base tip with the exception of Tip-tank, where lower values of this coefficient are observed for positive attack angles (Figure 13).

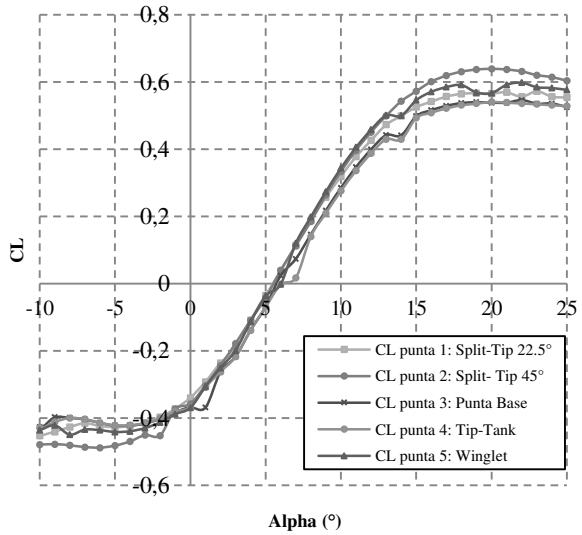


Figure 13. Simulated Lift Coefficient curves with CFX and turbulence model k-ε.

The lift coefficient values in Table 3, for α = 10º, show to the Tip 5 and Tip 2 with lift values higher by 20% and 16% with respect to the base tip, for α = 15º they show Tip 2 and Tip 5 with higher lift values by 14% and 9% respectively, which indicates that this type of tips have an increase in lift with respect to the blade with a base tip as a function of the angle of attack α.

Table 2. Simulated lift coefficients with α = 10º, 15º

Tip	CL(α=10°)	CL(α=15°)
1	0,318	0,525
2	0,333	0,572
3	0,285	0,498
4	0,275	0,493
5	0,343	0,545

The lift values for α = 10º Table 3, show Tip 5 and Tip 2 with CL values higher by 20% and 16% with respect to the base tip, for α = 15º, Punta 2 and Punta 5 present lift values greater by 14% and 9%, which indicates the incidence of this coefficient before changes in attack angle α.

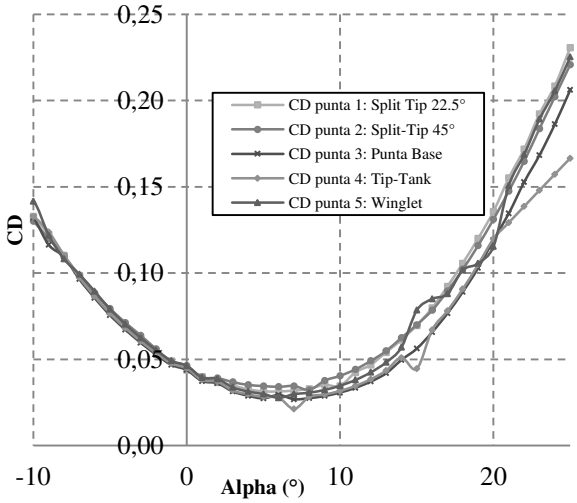


Figure 14. Curves of Drag coefficients simulated with CFX and turbulence model k-ε.

In Figure 14, there is an increase in the drag coefficient with positive angles α > 6 °, with the Split-Tip and Winglet tips having the highest simulated drag coefficient with respect to the base tip.

Table 3. Drag coefficients in device, and α = 5º, 10º, 15º.

Tip	CD(α=5°)	CD(α=10°)	CD(α=15°)
1	0,031	0,034	0,069
2	0,034	0,040	0,070
3	0,027	0,030	0,056
4	0,028	0,031	0,056
5	0,029	0,034	0,078

The coefficient of drag for α = 5º (Table 4), increases in all devices, the highest values are presented in Tip 2 and Tip 1, with increases in drag of 25% and 14% with respect to Tip 3 (base Tip), with α = 10º this increase in Tip 5 was 7%, and 3% for Tip 4. The relationship CL/CD (Figure15), allow to appreciate the value of the angle of attack in which the best aerodynamic performance, the modifications between devices are reflected in these curves, the Tip Winglet presented the highest ratio, followed by the Tip 3, which indicates that the best aerodynamic performance is given in the blade with Winglet tip, with an angle α = 10 °.

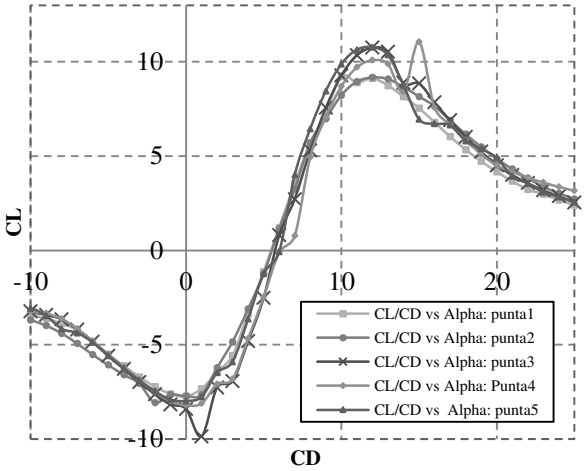


Figure 15. CL / CD curves simulated with CFX and turbulence model k-ε.

The CL / CD ratio decreases in most tip devices with the exception of Tip 5 (Table 4), which presents a 6% increase with respect to Tip 3 for an angle α = 10º. This indicates that this device has a better aerodynamic performance and can be used to increase efficiency in HAWT rotors, however this increase is susceptible to the angle of incidence of the wind.

Table 4. CL / CD relation for α = 5º, 10º, 15º.

Tip	CL/CD (α=10°)	CL/CD (α=15°)
1	9,227	7,541
2	8,225	8,165
3	9,273	8,857
4	8,700	6,900
5	9,871	6,958

The use of specialized software that uses MEF, through the Solver CFX, allows CFD simulations to be obtained, obtaining the behavior of the velocity of the fluid, once it crosses the different points of the designed blade, then vortex regions are used, very used in post CFD processing, which allow to show areas where this phenomenon is generated. (Figure16).

Velocity contours in Vortex Region.

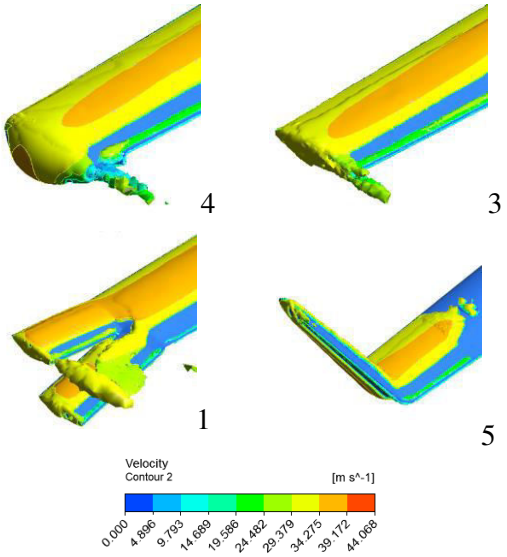


Figure 16. Contours (3D) of velocity in vortex formation region (isometric view).

In Figure 17, we can see the more rounded vortex region obtained by post processing of the 5 simulated tips, this tip called Tip-tank, has aerodynamic coefficient curves very similar to the base tip, tip3. With the exception that you can see a very rounded and more concentrated vortex.

Velocity contours in Vortex Region.

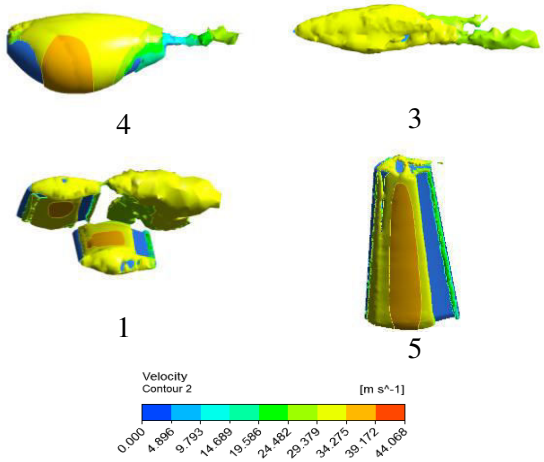


Figure 17. Contours (3D) of velocity in vortex formation region (side view).

5. CONCLUSIONS

The tip devices generate different forms of turbulence according to their geometry, this can be measured through the changes in the aerodynamic coefficient curves by means of CFX, the drag curve shows that the Split-tip points have a greater magnitude, highlighting the Winglet Point and Split-Tip tip with lift values greater than 20% and 16% with respect to the base tip, the highest CL / CD ratio in the Winglet tip was 6% with $\alpha = 10^{o}$.

The Post-processing of ANSYS allows to appreciate by means of planes of contours and plane of vectors the magnitudes and directions of the variables of speed and pressure that are generally very used in the design and evaluation of aeronautical devices, with these planes it was possible to appreciate the formation of circular vortices when the tip device is also circular Tip 4 (Tip-tank), the use of double Winglet or Split-tip, is not more efficient with respect to the base tip although this increases the lift by 10% also increases the drag by about 30%

The shapes in the regions of vortex obtained by simulation, allow appreciating notable differences, in Tip 5 where the smallest diameter of vortex region is observed, with a reduction of 84% with respect to the Base Tip (Tip 3) and in the Tip 2 a diameter of 83% greater is observed.

6. ACKNOWLEDGMENTS

Acknowledgments to the UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA (UMNG) in Bogotá, Colombia, for the support through the High Impact Project IMP_ING_2137 titled: *"Desarrollo de Micro turbina para el Aprovechamiento del Efecto de Vórtice en Punta de Aspa "*. And UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP), Brazil, for their cooperation.

7. REFERENCES

[1] F. Gato Gutierrez and Á. M. Gato Gutierrez, "Sistema de Aeronaves de Turbina," p. 456, 2012.

[2] W. Xie, P. Zeng, and L. Lei, "Wind tunnel experiments for innovative pitch regulated blade of horizontal axis wind turbine," *Energy*, vol. 91, pp. 1070–1080, 2015.

[3] J. Chen, Q. Wang, S. Zhang, P. Eecen, and F. Grasso, "A new direct design method of wind

turbine airfoils and wind tunnel experiment," *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 3, pp. 2002–2014, 2016.

[4] H. Peng, W. Qiu, and S. Ni, "Effect of turbulence models on RANS computation of pchordller vortex flow," *Ocean Eng.*, vol. 72, no. June, pp. 304–317, 2013.

[5] G.-Y. Huang, Y. C. Shiah, C.-J. Bai, and W. T. Chong, "Experimental study of the protuberance effect on the blade performance of a small horizontal axis wind turbine," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 147, pp. 202–211, 2015.

[6] A. Ali, H. Chowdhury, B. Loganathan, and F. Alam, "An Aerodynamic Study of a Domestic Scale Horizontal Axis Wind Turbine With Varied Tip Configurations," *Procedia Eng.*, vol. 105, no. Icte 2014, pp. 757–762, 2015.

[7] B. Zhu, X. Sun, Y. Wang, and D. Huang, "Performance characteristics of a horizontal axis turbine with fusion winglet," *Energy*, 2016.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL CICLO COMBINADO EN MODO HÍBRIDO DEL VALLE DE MÉXICO DE 384 MW A DIFERENTES CARGAS PARCIALES CONSIDERANDO CAÍDAS DE PRESIÓN Y DE TEMPERATURA

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE COMBINED CYCLE IN THE HYBRID MODE OF VALLE DE MEXICO OF 384 MW AT DIFFERENT PARTIAL LOADS AND CONSIDERING PRESSURE AND TEMPERATURE DROPS

Ing. Sandra Marisol Sánchez Domínguez*, PhD. Raúl Lugo Leyte, PhD. Helen Denise Lugo Méndez, MSc. Israel Eliú Hernández Mora*, MSc. Edgar Vicente Torres González***

*Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.
Avenida San Rafael Atlixco No.186, Colonia Vicentina, 09340 Iztapalapa, CDMX, México.
00-52-55-58044600-Ext.1156
E-mail: smsd@xanum.uam.mx, lulr@xanum.uam.mx, iehm@xanum.uam.mx, etorres@xanum.uam.mx.

** Universidad Autónoma Metropolitana, Cuajimalpa, Departamento de Procesos y Tecnología.
Av. Vasco de Quiroga No. 4871, Colonia Santa Fé, 05348, Cuajimalpa, CDMX, México.
00-52-55-5513539337
E-mail: hlugo@correo.cua.uam.mx.

Resumen: En este trabajo se evalúa el desempeño termodinámico de un ciclo combinado en modo híbrido a diferentes cargas, se realiza un análisis energético y exergético, considerando las caídas de presión y temperatura en las extracciones de vapor. Los resultados muestran que la cámara de combustión, el generador de vapor y la turbina de vapor, son las fuentes principales de irreversibilidades y representan más del 38 % de las pérdidas totales de exergía, donde la CC representa la mayor pérdida de exergía con 16.60 %. La eficiencia térmica y exergética del ciclo son 58.79 % y 77.40 %, respectivamente. La eficiencia térmica del ciclo combinado disminuye 6.78 % y 16.95 % al operar a una carga de 75 % y 50 %, respectivamente. La relación del calor suministrado por el GV y el calor de los gases de combustión de la TG al ciclo híbrido es de 3.41.

Palabras clave: Ciclo híbrido, Eficiencia, Exergía, Irreversibilidades.

Abstract: In this work the thermodynamic performance of a combined cycle in hybrid mode at different loads is evaluated, an energy and exergy analysis is performed, considering the pressure and temperature drops in the steam extractions. The results show that the combustion chamber, the steam generator and the steam turbine are the main sources of irreversibilities and represent more than 38% of the total exergy losses, where the CC represents the highest loss of exergy with 16.60%. The thermal and exergetic efficiency of the cycle are 58.79% and 77.40%, respectively. The thermal efficiency of the combined cycle decreases 6.78% and 16.95% when operating at a load of 75% and 50%, respectively. The ratio of the heat supplied by the GV and the heat of the combustion gases from the TG to the hybrid cycle is 3.41.

Keywords: Hybrid cycle, Efficiency, Exergy, Irreversibilities.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria y las instituciones académicas han realizado un esfuerzo importante para el desarrollo eficiente y rentable de las centrales eléctricas. Se han investigado diferentes tecnologías, tales como energía solar, celdas de combustible, ciclos combinados, ciclos Rankine orgánicos, cogeneración, motores de combustión interna, arreglos híbridos, entre otros. Los ciclos combinados generan el 50 % de energía eléctrica en México y es muy importante en los países donde el gas natural está disponible para la generación de electricidad. Como estos ciclos de potencia representan una manera atractiva de producir energía eléctrica a partir de gas natural, el emplear un análisis de desempeño, aplicando la primera y segunda ley de la termodinámica es conveniente, ya que se obtiene la eficiencia térmica, la destrucción de exergía y la eficiencia exergética de la planta.

Los tres componentes principales del ciclo combinado son: turbina de gas (TG); caldera de recuperación de calor (CRC); turbina de vapor (TV); sin embargo, la TG es el equipo que más influye en el desempeño (Okoroigwe y Madhlopa, 2016). Las centrales de ciclo combinado, así como nucleares, solares, ciclos convencionales, entre otras, utilizan una sola fuente de calor. El usar más de una fuente de calor a diferentes temperaturas tiene ganancias en la eficiencia y reducción de emisiones y costos. Los sistemas híbridos de energía están relacionados con el concepto de repotenciación. Además, el sistema híbrido es aquel que utiliza múltiples fuentes de calor, ya sean de origen diferente o del mismo (Yue & Lior, 2018).

El mercado eléctrico siempre sigue las variaciones diarias, semanales y estacionales de la carga. Por lo tanto, existen fluctuaciones de carga en los sistemas de energía, provocando: cambio de carga frecuente; operación a carga parcial; disminución de la eficiencia térmica de la central; así como emisiones de gases contaminantes. Las centrales que operan con gas natural, presentan un rápido cambio de carga y un menor nivel de emisiones comparado con las carboeléctricas. Sin embargo, su eficiencia de la central disminuye rápido con la reducción de la carga, además la variación de carga no es amplia (Gonzalez, *et al.,* 2018). Por lo tanto, predecir y estudiar las características de funcionamiento de las centrales de potencia que operan a carga parcial es de gran importancia. La regulación de la carga en las centrales termoeléctricas es por admisión parcial, mientras que en los ciclos combinados se realiza mediante presión deslizante, que consiste en regular la carga siguiendo a la presión de la caldera, ya que, de ese modo, las temperaturas de saturación se adaptan a las cargas en la caldera y la recuperación de calor es más eficiente.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DEL CICLO COMBINADO EN MODO HÍBRIDO

En este estudio se utilizan datos reales de funcionamiento del "paquete 4" en modo híbrido de la central del Valle de México, que es el acoplamiento de la unidad 4 (ciclo Rankine regenerativo con recalentamiento intermedio) y las unidades 5, 6 y 7 (ciclos de turbina de gas). Este modo de operación híbrido es el único ciclo aplicado en nuestro país, además de ser un ciclo de poca aplicación en el mundo. La central está ubicada en el municipio de Acolman, Estado de México, México y empezó a funcionar como ciclo híbrido en el año 2002. El combustible que se utiliza en las turbinas de gas es gas natural, sin embargo, en los generadores de vapor se puede usar combustóleo. La Figura 1 muestra el diagrama esquemático del ciclo combinado en modo híbrido, consta de tres TG; una TV; tres CRC de dos presiones y un GV. Este consta de 40 estados termodinámicos en el ciclo de vapor y 14 estados en el ciclo de gas (CFE, 2005).

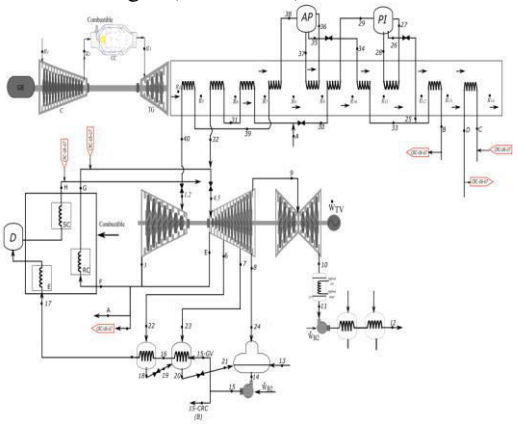


Fig. 1. Diagrama esquemático del Ciclo Híbrido

En la Tabla 1 se presentan las especificaciones técnicas de los principales equipos del ciclo

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los equipos principales del ciclo

Relación de presiones del compresor	*15.5*
Potencia de la turbina de gas, MW	84
Potencia de la turbina de vapor, MW	300
Caída de presión en las extracciones, %	5
Caída de temperatura en las extracciones, %	50
Temperatura de vapor vivo, °C	526
Presión de vapor vivo, bar	166.5
Presión de condensación, bar	0.076
Temperatura de condensación, °C	40.60

3. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

En este trabajo se realiza un estudio termodinámico de un ciclo combinado en modo híbrido con datos reales de la central. También se realiza un análisis paramétrico a diferentes cargas de operación. Para el estudio de desempeño termodinámico de la central, se realiza un análisis energético y un análisis exergético. Para los cálculos de los estados termodinámicos, se hacen las siguientes suposiciones:

1. Los productos de combustión y el aire se comportan como gases ideales.
2. La composición molar del aire es 78 % N_2 y 21 % O_2.
3. La composición del combustible es 88 % CH_4, 9 % C_2H_6 y 3 % C_3H_8, con un PCI de 49,383.57 kJ/kg.
4. Las condiciones del estado muerto son P_0= 1 bar y T_0= 273.15 K.
5. No existen pérdidas de energía por transferencia de calor en los equipos del ciclo.

Como resultado de las consideraciones antes mencionadas, la composición de los gases de combustión obtenida es 6.87 % CO_2, 5.26 % H_2O, 74.88 % N_2 y 12.99 % O_2. Y la relación aire-combustible, *rac,* es 39.61 kg_a/kg_{comb}. A continuación, se explican los métodos de análisis de desempeño, se realiza un análisis a diferentes cargas y los resultados se comparan con los resultados operativos reales.

3.1 Ciclo de gas

El estudio energético del ciclo combinado en modo híbrido, se lleva a cabo al dividir el sistema en los ciclos de gas y vapor, respectivamente. Se aplican las ecuaciones de balance de masa y energía a cada equipo de la central para obtener los estados del ciclo. Las ecuaciones se describen en esta sección.

Nota: Todo el cambio de entropía en cada estado del ciclo, se obtiene con la siguiente expresión

$$s_i = s_0 + c_{P_i} \ln\left(T_i/T_0\right) - R_i \ln\left(P_i/P_0\right) \qquad (1)$$

Los ciclos de gas operan con el ciclo termodinámico Joule-Brayton para producir energía mecánica. Sus equipos principales del ciclo son: Compresor, Cámara de Combustión y Turbina de Gas. El ciclo de gas abierto es más popular debido a la capacidad que tiene para alcanzar temperaturas muy altas a la entrada de la turbina, haciendo más eficiente al ciclo, más compacto y menos costoso (Olumayegun, *et al.*, 2016). En la central de ciclo combinado en modo híbrido, el aire entra al compresor (C) a temperatura ambiente, después de la compresión, el aire comprimido entra a la cámara de combustión (CC), donde, junto con el gas natural, se lleva a cabo la combustión; en consecuencia, la temperatura de los gases de combustión llega a 1,300 °C. Los gases de combustión se expanden en la TG, donde salen de la turbina a una temperatura de 538 °C a 600 °C. La Figura 2 muestra el diagrama Temperatura-entropía del ciclo de la turbina de gas y de los gases de combustión (g_4-g_{14}), estos gases de combustión entran a la CRC a 674 °C, después de ceder su energía al agua de alimentación, estos gases salen al medio ambiente a 163.41 °C. A continuación, se describen las ecuaciones para obtener los parámetros de desempeño.

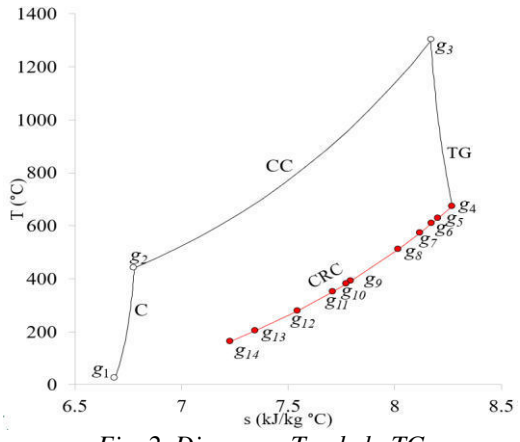


Fig. 2. Diagrama T-s de la TG

La temperatura del aire después de la compresión es

$$T_{g_2} = T_{g_1}\left[1+\left(1/\eta_{SIC}\right)\left(\pi_C{}^{x_a}-1\right)\right] \quad (2)$$

La potencia suministrada al compresor es

$$\dot{W}_C = \frac{\dot{m}_a c_{P_a} T_{g_1}}{\eta_{SIC}}\left(\pi_C^{x_a}-1\right) \quad (3)$$

El flujo de calor suministrado a la turbina de gas

$$\dot{Q}_{sumTG} = \dot{m}_a c_{P_a} T_{g_1}\left[(rca+1)\frac{c_{P_{gc}}}{c_{P_a}} y - 1 - \frac{1}{\eta_{SIC}}\left(\pi_C^{x_a}-1\right)\right] \quad (4)$$

La temperatura de los gases de combustión se expresa como

$$T_{g_4} = T_{g_3}\left\{1-\eta_{SIT}\left[1-\left(1/\pi_C{}^{x_{gc}}\right)\right]\right\} \quad (5)$$

La potencia generada por TG se puede escribir como sigue

$$\dot{W}_{TG} = \dot{m}_a c_{P_{gc}}(1+rca)\left\{T_{g_3}\eta_{SIT}\left[1-\left(1/\pi_C^{x_{gc}}\right)\right]\right\} \quad (6)$$

El flujo de aire y flujo de combustible utilizados en el ciclo de gas, se calculan respectivamente con

$$\dot{m}_a = \dot{W}_{TG}/w_M = \dot{W}_{TG}/(w_{TG}-w_C) \quad (7)$$

$$\dot{m}_{comb} = \dot{m}_a/rac \quad (8)$$

El flujo de gases de combustión es la suma del flujo de aire y combustible que entran a la CC.

$$\dot{m}_{gc} = \dot{m}_{comb} + \dot{m}_a \quad (9)$$

La eficiencia térmica del ciclo de gas se expresa como

$$\eta_{TG} = \left(\dot{W}_{TG}-\dot{W}_C\right)/\dot{Q}_{sumTG} \quad (10)$$

Para realizar un análisis exergético e identificar la fuente, lugar y magnitud de la irreversibilidad, primero se debe entender que la exergía se define como el máximo trabajo que se puede producir en un proceso o un sistema cuando se alcanza un equilibrio con el entorno de referencia. Este tipo de análisis se aplica a una amplia gama de procesos y sistemas, para evaluarlos y mejorarlos (Gupta, y otros, 2015). La exergía de flujo para cada estado del ciclo de gas y vapor, se expresa como la suma de la exergía química y física (Lara, *et al.*, 2017), en este trabajo se desprecia la exergía cinética y potencial.

$$\dot{E}^{fis} = \dot{m}\left[\left(h-h_0\right)-T_0\left(s-s_0\right)\right] \quad (11)$$

Las irreversibilidades se obtienen al aplicar un balance de exergía como se muestra en la ecuación (12) donde ya se considera la destrucción de exergía y la transferencia de calor.

$$\dot{E}_Q + \sum \dot{E}_e = \sum \dot{E}_s + \dot{W} + \dot{I} \quad (12)$$

La irreversibilidad para el proceso de compresión se expresa como

$$\dot{I}_C = \dot{E}_{g_1} + \dot{W}_C - \dot{E}_{g_2}$$

La exergía química del combustible se expresa de la siguiente manera

$$\tilde{\varepsilon}_{0_{mezcla}} = \left[\sum_i x_i \tilde{\varepsilon}_{0i} + RT_0 \sum_i x_i \ln(x_i)\right] \quad (13)$$

donde, x_i, es la fracción molar de los componentes.

Otra forma de obtener la exergía del combustible es con la ecuación (14), donde el término ξ, es el cociente de la exergía química del combustible y el poder calorífico del mismo, este término se obtiene con la ecuación (15) a partir del número de carbonos, *n,* e hidrógenos, *m,* (Kotas, 1985).

$$\dot{E}_{comb} = \dot{m}_{comb} PCI_{comb}\xi = \dot{W}_{máx} \quad (14)$$

$$\xi = 1.033 + 0.0169\left(m/n\right) - \left(0.0698/n\right) \quad (15)$$

La exergía química para un gas ideal se expresa de la siguiente manera, donde P_i, es la presión parcial del compuesto y P_0, la presión de referencia

$$\tilde{\varepsilon}_i = RT_0 \ln\left(P_i/P_0\right) \quad (16)$$

La irreversibilidad de la cámara de combustión se expresa como

$$\dot{I}_{CC} = \dot{W}_{máx} + \left(\dot{E}_{g_2} - \dot{E}_{g_3}\right) - \dot{E}_Q$$

La irreversibilidad para el proceso de expansión se expresa como

$$\dot{I}_{TG} = \dot{E}_{g_3} - \dot{E}_{g_4} - \dot{W}_{TG}$$

La eficiencia exergética del ciclo de gas se expresa de la siguiente manera (Fallah, *et al.*, 2016):

$$\psi_{TG} = \dot{W}_{TG}/\dot{E}_{comb} \quad (17)$$

La Figura 3 muestra los estados del ciclo de gas y de los gases de combustión. El proceso de combustión presenta el mayor incremento de exergía con 1,021 kJ/kg. Así también, muestra que los gases de combustión salen de la turbina con una exergía de 819 kJ/kg y con 402.72 kJ/kg de la CRC.

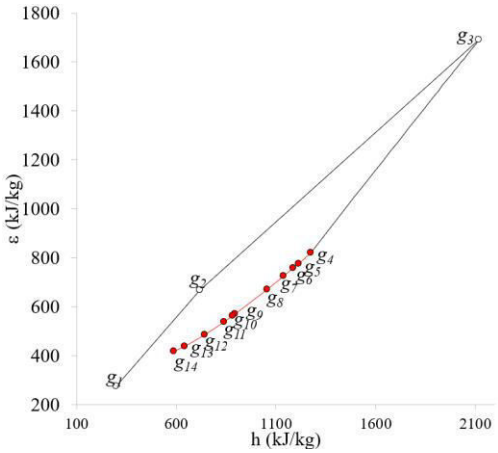


Fig. 3. Diagrama ε-h de la TG

3.2 Ciclo de vapor

Este ciclo opera con el ciclo termodinámico Rankine regenerativo con recalentamiento. En esta sección, se describen las ecuaciones para el análisis energético del ciclo. La TV es un dispositivo útil para convertir la energía térmica en energía mecánica. Además, otro beneficio de los sistemas de turbinas de vapor es que poseen la capacidad de usar distintos tipos de combustibles en el GV y también se pueden usar distintos fluidos como fluido de trabajo. La eficiencia térmica de una planta moderna de energía de ciclo Rankine puede alcanzar más del 40 % y se puede aumentar mediante el uso de opciones combinadas o integradas de ciclo y/o subsistemas de recuperación de calor (Salisbury, 1950; Mohammad y McGowan, 2018).

El calor suministrado por el GV es un dato dado por el prontuario de la central, éste cambia según la carga a la que se opere, por ejemplo: al 100 % de carga se suministra 454 MW, y al operar al 75 % y 50 % se suministra 417 y 410 MW respectivamente. Por otra parte, el calor rechazado en el condensador se expresa como

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{v_{10}} \left(h_{v_{10}} - h_{v_{11}} \right) \tag{18}$$

En la CRC, las diferencias de temperaturas de *pinch point* para los evaporadores son de gran importancia, a partir de estos se obtiene la temperatura del estado g_9 y g_{12} del ciclo de gas, estos se expresan como

$$\Delta T_{PP,PI} = T_{g_{12}} - T_{v_{27}} \tag{19}$$

$$\Delta T_{PP,AP} = T_{g_9} - T_{v_{36}} \tag{20}$$

El flujo de vapor que se produce para trabajar las turbinas es

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{\dot{W}_{TV}}{w_M} = \frac{\dot{W}_{TV}}{|w_{TV}| - |w_B|} \tag{21}$$

El flujo de combustible quemado en el GV se obtiene como

$$\dot{m}_{comb,GV} = \left(\dot{Q}_{sum,GV} \right) \Big/ PCI \tag{22}$$

Los balances de energía de los equipos que conforman la CRC son de gran importancia, ya que con estos se obtienen los flujos de vapor que se extraen en la TVPI y se obtiene la energía cedida al vapor de agua. Estos balances por equipo se expresan como

$$SCAP: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_4} - T_{g_5}) = \dot{m}_{V_{39}} (h_{V_{40}} - h_{V_{39}}) \tag{23}$$

$$SCPI3: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_5} - T_{g_6}) = \dot{m}_{V_{32}} (h_{V_{32}} - h_{V_{31}}) \tag{24}$$

$$SCPI2: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_6} - T_{g_7}) = (\dot{m}_{V_{31}} + \dot{m}_A)(h_{V_{31}} - h_{V_{30}}) \tag{25}$$

$$SCAP1: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_7} - T_{g_8}) = \dot{m}_{V_{38}} (h_{V_{39}} - h_{V_{38}}) \tag{26}$$

$$EVAP: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_8} - T_{g_9}) = \dot{m}_{V_{36}} (h_{V_{37}} - h_{V_{36}}) \tag{27}$$

$$\text{SCPI1}: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_9} - T_{g_{10}}) = \dot{m}_{V_{29}} (h_{V_{30}} - h_{V_{29}}) \tag{28}$$

$$\text{ECAP2}: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_{10}} - T_{g_{11}}) = \dot{m}_{V_{34}} (h_{V_{34}} - h_{V_{33}}) \tag{29}$$

$$\text{EVPI}: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_{11}} - T_{g_{12}}) = \dot{m}_{V_{27}} (h_{V_{28}} - h_{V_{27}}) \tag{30}$$

$$\text{ECAP1}: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_{12}} - T_{g_{13}}) = \dot{m}_{V_{15CRC}} (h_{V_{25}} - h_{V_{15CRC}}) \tag{31}$$

$$\text{ECBP}: c_{P_{gc}} \dot{m}_{gc} (T_{g_{13}} - T_{g_{14}}) = \dot{m}_{V_{12}} (h_{V_{13}} - h_{V_{12}}) \tag{32}$$

La potencia generada por la TV se expresa como

$$\dot{W}_{TV} = \dot{W}_{TVAP} + \dot{W}_{TVPI} + \dot{W}_{TVBP} \tag{33}$$

El trabajo suministrado a las bombas se expresa como

$$\dot{W}_B = \dot{m}_{V11} (h_{V_{12}} - h_{V_{11}}) + \dot{m}_{V14} (h_{V_{15}} - h_{V_{14}}) \tag{34}$$

Potencia motora es la resta de la potencia de la turbina y de la bomba

$$\dot{W}_M = \left|\dot{W}_{TV}\right| - \left|\dot{W}_B\right| \quad (35)$$

El flujo de calor suministrado al ciclo de vapor es

$$\dot{Q}_{sum_{TV}} = \dot{Q}_{sum_{GV}} + \dot{Q}_{sum_{CRC-U5}} \quad (36)$$

Eficiencia del ciclo de la turbina de vapor

$$\eta_{TV} = \dot{W}_{TV} / \dot{Q}_{sumTV} \quad (37)$$

La Figura 4 muestra como el ciclo de vapor aprovecha la energía de los gases de combustión provenientes de la TG, mientras se hacen pasar por la CRC, donde calientan, evaporan y sobrecalientan el 43 % del flujo de agua de alimentación y el 57 % restante, se envía al GV para ser precalentado. Todo el vapor producido por estos equipos, se utiliza en la TV para producir 300 MW, para cerrar el ciclo, un condensador convierte el vapor de la turbina en liquido saturado, para bombearlo y llevarlo hasta el generador de vapor. En el proceso de condensación se pierde el 89 % de la energía suministrada al ciclo de vapor.

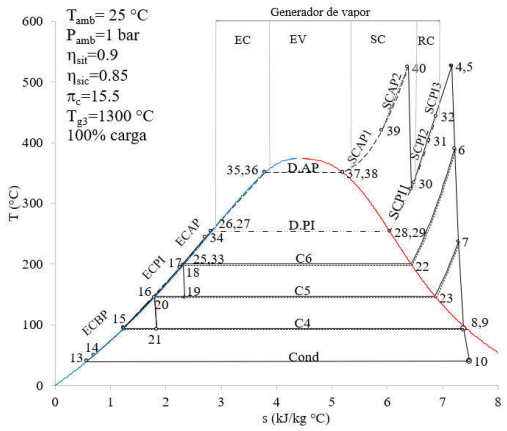


Fig. 4. Diagrama T-s del ciclo de vapor

Las irreversibilidades de los equipos del ciclo de vapor se expresan como

CRC: $$\dot{E}_{v_{15CRC}} + \dot{E}_{g_4} + \dot{E}_A - \dot{E}_{v_{40}} - \dot{E}_{v_{32}} - \dot{E}_{g_{14}} \quad (38)$$

GV: $$\dot{E}_{v_{17}} + \dot{E}_F + \dot{E}_{comb} - \dot{E}_H - \dot{E}_G \quad (39)$$

TV: $$\dot{E}_{v_2} - \dot{E}_{v_3} - \dot{W}_{TV,AP} + \dot{E}_{v_5} + \dot{E}_E - \dot{E}_{v_6} - \dot{E}_{v_7} - \dot{E}_{v_8} - \dot{E}_{v_9} - \dot{W}_{TV,PI} + \dot{E}_{v_9} - \dot{E}_{v_{10}} - \dot{W}_{TV,BP} \quad (40)$$

Cond: $$\dot{E}_{v_{10}} + \dot{E}_{agua_{in}} - \dot{E}_{v_{11}} - \dot{E}_{agua_{out}} \quad (41)$$

B: $$\dot{E}_{v_{11}} + \dot{W}_{B1} - \dot{E}_{v_{12}} + \dot{E}_{v_{14}} + \dot{W}_{B2} - \dot{E}_{v_{15}} \quad (42)$$

La eficiencia exergética del ciclo de vapor se expresa como

$$\psi_{TV} = \dot{W}_{TV} / \dot{E}_{comb,GV} \quad (43)$$

El flujo de calor suministrado, la potencia generada del ciclo híbrido se expresa como

$$\dot{Q}_{CH} = \dot{Q}_{sumTV} + 3\dot{Q}_{sumTG} \quad (44)$$

$$\dot{W}_{CH} = \dot{W}_M + 3\dot{W}_{TG} \quad (45)$$

La eficiencia térmica de ciclo combinado en modo híbrido se expresa como

$$\eta_{CH} = \left(\eta_{TG} + \eta_{TV} - \eta_{TG}\eta_{TV} + \beta\eta_{TV}\right)/\left(1+\beta\right) \quad (46)$$

En donde β, es la relación del calor suministrado por el GV y por la CRC.

$$\beta = \dot{Q}_{sum,GV} / \dot{Q}_{sum,CRC} \quad (47)$$

La eficiencia exergética del ciclo combinado en modo híbrido, se expresa de la siguiente manera

$$\psi_{CH} = \dot{W}_{CH} / \dot{E}_{comb} \quad (48)$$

La Figura 5 muestra que la menor exergía se tiene en el proceso de condensación, y aunque la energía que se pierde en este equipo es alta, la calidad es baja y no se puede aprovechar. El vapor a la entrada de la TVAP presenta la mayor exergía del ciclo.

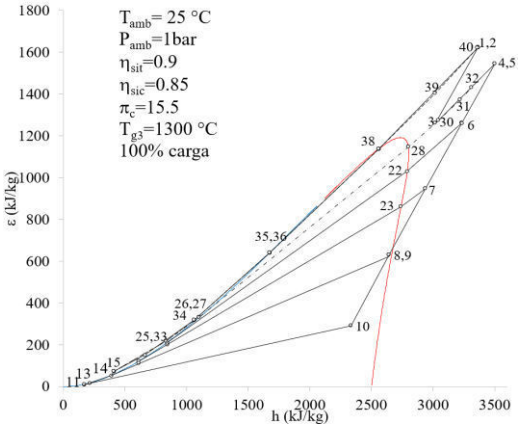


Fig. 5. Diagrama ε-h del ciclo de vapor

Resultados

La Figura 6 muestra el perfil de temperaturas de la CRC, donde se representa el intercambio de energía en forma de calor de los gases de combustión y el agua de alimentación. Se muestra que los gases entran a una temperatura de 674 °C y

disminuyen mientras pasa por cada equipo hasta llegar a 163.41 °C, aproximadamente. El agua de alimentación entra a contra flujo de los gases a una temperatura de 40 °C. En el economizador y evaporador se tiene la mayor transferencia de calor. El cambio de temperatura de *pinch point* de alta e intermedia presión, es 41.73 °C y 25.58 °C, respectivamente. La temperatura de aproximación caliente tiene un valor de 150 °C.

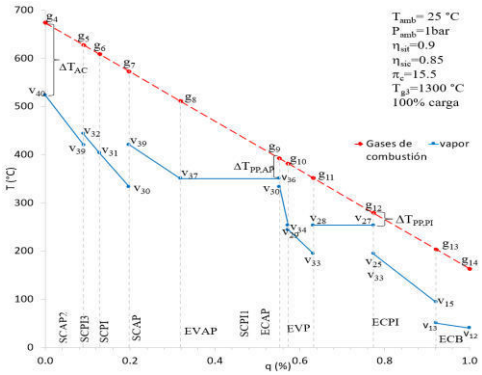


Fig. 6. Perfil de temperaturas de la CRC

La Figura 7 muestra que la eficiencia térmica del ciclo de gas es de 30.66 % al 100 % de carga, mientras que en el ciclo de vapor es 48.9 %; sin embargo, al trabajar como ciclo híbrido la eficiencia de la central aumenta hasta 54.50 %. La Figura 8 muestra que la eficiencia térmica del ciclo híbrido es afectada por el factor β. Al trabajar al 100 % de carga, se tiene un valor de β = 3.4131, es decir, la fuente que aporta más calor es el GV. Este factor, decrece conforme la carga se reduce, así como la eficiencia térmica y exergética del ciclo. Al operar al 100 % de carga, se tiene una eficiencia térmica de 54.50 % y considerando pérdidas en la CRC es 59.42 %, mientras que la eficiencia exergética es de 77.40 %. La eficiencia térmica disminuye 6.78 % y 16.95 % al operar al 75 % y 50 % de carga, mientras que la exergética disminuye 2.55 % y 10.16 % respectivamente.

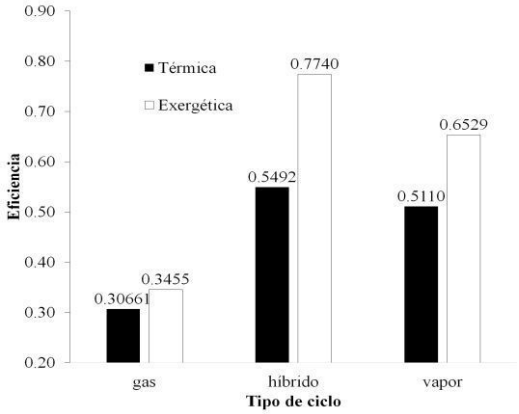


Fig. 7. Eficiencia térmica y exergética de los ciclos que conforman al ciclo combinado híbrido

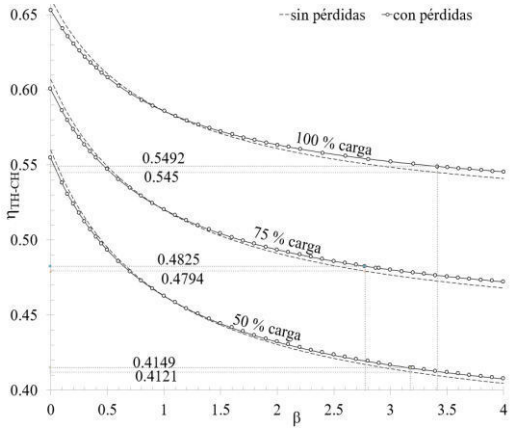


Fig. 8. Eficiencia térmica de ciclo combinado en modo híbrido para diferentes β

La Figura 9 muestra los equipos y el porcentaje de energía pérdida respecto al calor suministrado. Los equipos donde se tiene una reacción de combustión, son los que aportan mayores irreversibilidades, 28.82 %. Del 16.61 % corresponden a la CC, el 14% son perdidas inevitables debido a la oxidación del combustible. Los equipos con menos irreversibilidades, 0.67 %, son los calentadores (Cal), la bomba y el compresor. Las irreversibilidades de los equipos representan el 41.66 %, esto en energía es más de 600 MW. Esta energía perdida disminuye 6.15 % y 10.85 % al operar al 75 % y 50 % de carga.

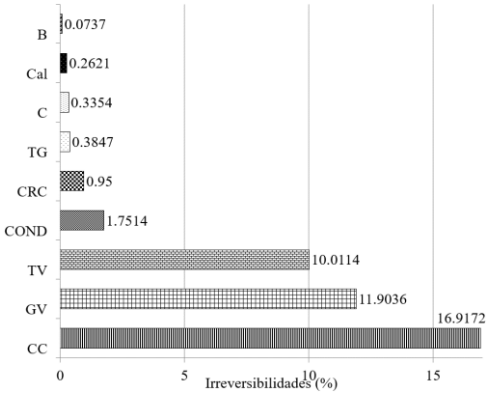


Fig. 9. Porcentaje de irreversibilidades en los equipos del ciclo combinado en modo híbrido

6 CONCLUSIONES

Los resultados muestran que contar con las dos fuentes de calor, presenta ventajas respecto al ciclo de gas y el ciclo de vapor, pues esto se refleja en un aumento en la eficiencia térmica.

La cámara de combustión, el generador de vapor y la turbina de vapor, son los equipos que más contribuyen a las irreversibilidades, por lo tanto, también tienen un gran impacto en la eficiencia total de la central.

Operar el ciclo a 50 % y 75 %, provoca la disminución de la eficiencia térmica y exergética, además de cantidades altas de energía.

En esta unidad, no se hace una cogeneración de los gases de combustión del GV, sin embargo, si se llega a utilizar ese flujo de gases de combustión para precalentar el agua de alimentación, se tendrá un aumento en la eficiencia térmica de la central, y se reducirá el impacto ambiental.

Finalmente, este trabajo se puede complementar con un análisis exergoeconómico-ambiental, con el objetivo de mejorar el análisis de desempeño de esta central y así, mejorar en el conocimiento de alternativas para la disminución del impacto ambiental.

REFERENCIAS

CFE. (2005). *Prontuario de la Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido "Valle de México".*

Fallah, M., Siyahi, H., Akbarpour Ghiasi, R., Mahmoudi, S., Yaria, M., & Rosen, M. (2016). Comparison of different gas turbine cycles and advanced exergy analysis of the most effective. *Energy*, 701-715.

Gonzalez Salazar, M. A., Kirsten, T., & Prchlik, L. (2018). Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1497-1513.

Gupta, M., Kaushik, S., Ranjan, K., Reddyd, S., Tyagie, S., & Panwarc, N. (2015). Thermodynamic performance evaluation of solar and other thermal power generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 567-582.

Kotas, T. (1985). *The exergy method of thermal plant analysis.* Florida: Butterworth-Heinemann .

Lara, Y., Petrakopoulou, F., Morosuk, T., Boyano, A., y Tsatsaronis, G. (2017). An exergy-based study on the relationship between costs and environmental impacts in power plants. *Energy*, 920-928.

Mohammad, K., y McGowan, J. G. (2018). Thermodynamic analysis of hybrid cycles based on a regenerative steam Rankine cycle for cogeneration and trigeneration. *Energy Conversion and Management*, 460-475.

Okoroigwe, E., y Madhlopa, A. (2016). An integrated combined cycle system driven by a solar tower: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 337-350.

Olumayegun, O., Wang, M., & Kelsall, G. (2016). Closed-cycle gas turbine for power generation: A state-of-the-art review. *Fuel*, 694-717.

Salisbury, J. K. (1950). *Steam Turbines and Their Cycles.* New York: Wiley.

Yue, T., & Lior, N. (2018). Thermodynamic analysis of hybrid Rankine cycles using multiple heat sources of different temperatures. *Applied energy*, 564-583.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

CARACTERIZACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR COMPACTO CON RECUBRIMIENTO SELECTIVO

CHARACTERIZATION OF A COMPACT SOLAR COLLECTOR WITH SELECTIVE COATING

Joaquín-Alfredo Velázquez-Olvera*, David Palomino-Merino, Stephanía Velázquez-Olvera*, Enrique Barrera-Calva***

* Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina, Iztapalapa 09340, Ciudad de México. México.
E-mail: juaco2911@gmail.com

** Departamento de Instrumentación Científica e Industrial. Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México.
E-mail: david.palomino@icat.unam.mx

Resumen: Se presentan los resultados de la caracterización de un colector solar compacto de tubos aletados con recubrimiento selectivo orgánico utilizado para calentar agua y un nanofluido. Se realizaron mediciones de radiación térmica y de temperaturas en entrada y salida de agua del colector así como en la cubierta y placa de absorción del colector, que fueron empleadas para calcular el calor útil, el factor de remoción de calor y la eficiencia. El colector se conecta a un tanque de almacenamiento para realizar la primera caracterización con agua. Posteriormente se añade un intercambiador de calor, dentro del tanque de almacenamiento, y se hace circular un nanofluido que intercambia calor con el agua almacenada y regresa al colector por el efecto termosifón. El intercambiador es construido en forma de espiral con tubo de cobre y el nanofluido es preparado mediante una solución de agua con nanopartículas de Óxico de Zinc. El nanofluido tiene mejores propiedades térmicas que el agua, lo cual aumenta su energía interna, el intercambio de calor, y su eficiencia respecto a la de un colector convencional que funciona con agua. Los resultados muestran la mejora en la eficiencia respecto a colectores convencionales debido a su recubrimiento orgánico, pero también al uso del nanofluido.

Palabras clave: Colector solar, recubrimiento orgánico, nanofluido, termosifón, factor de remoción de calor.

Abstract: The results of the characterization of a compact solar collector of finned tubes with organic selective coating, used to heat water and a nanofluid, are presented. Measurements of thermal radiation and temperatures in the water inlet and outlet of the collector were made as well as in the cover and collector absorption plate, which were used to calculate the useful heat, the heat removal factor and the efficiency. The collector is connected to a storage tank to perform the first characterization with water. Later, a heat exchanger is added inside the storage tank, and a nanofluid that exchanges heat with the stored water is circulated to returns to the collector for the thermosyphon effect. The heat exchanger is built in spiral form with copper tube and the nanofluid is prepared by a water solution with zinc oxide nanoparticles. The nanofluid has better thermal properties

than water, this increases its internal energy, heat exchange, and its efficiency compared with a conventional collector that works with water. The results show the improvement in efficiency with respect to conventional collectors due to their organic coating, but also to the use of nanofluid.

Keywords: Solar collector, organic coating, nanofluid, thermosyphon, heat removal factor.

1. INTRODUCCIÓN

Calentadores solares son utilizados ampliamente en la actualidad para calentamiento de agua o aire para uso doméstico o industrial, o para calentamiento de sustancias refrigerantes o, más recientemente, nanofluidos, cuyas propiedades térmicas son útiles para intercambiar calor con agua. Los refrigerantes tienen puntos de solidificación por debajo de la del agua, de modo que permite su uso en climas fríos sin que haya un congelamiento del agua debido a las condiciones ambientales. Los nanofluidos son utilizados más recientemente debido a su mejor conductividad térmica y, consecuentemente, su difusividad térmica, que mejoran la eficiencia del colector o reducen su tamaño.

Las aplicaciones de los colectores solares son diversas. Principalmente son utilizados para calentamiento de agua que es almacenada en un tanque para su uso directo o es precalentada para ser utilizada en un calentador doméstico de gas o en una caldera, a modo de reducir el uso del combustible fósil. También son utilizados para calefacción, para calentar alimentos, o como sistema de secado de granos comestibles. Los colectores solares representan, por consiguiente, una excelente alternativa sustentable para cubrir las necesidades de estos sectores domésticos e industriales.

Hay una gran diversidad de mercado de colectores solares en México, y la gran mayoría son de origen extranjero. Los fabricados en nuestro país cumplen las normas de calidad recomendadas por los organismos gubernamentales, sobre todo respecto a sus componentes, su sustentabilidad, y su eficiencia energética, excepto por sus recubrimientos selectivos, como el óxido de titanio, que son de importación y utilizan sustancias y procesos altamente tóxicos y dañinos para el medio ambiente. Estos recubrimientos selectivos son preparados mediante procesos de electrodeposición con una mezcla de ácidos orgánicos, y se utilizan para mejorar la absorción del calor proveniente de la radiación térmica solar [1].

El reto del presente estudio consiste en contribuir a mejorar la eficiencia térmica de los colectores, mediante el aumento de la transferencia de calor en los tubos absorbedores, debido a su recubrimiento selectivo orgánico y mediante el uso de nanofluidos de óxidos metálicos como fluido de trabajo. Ambas tareas representan una buena contribución para obtener colectores solares más compactos, más eficientes, y con mejor intercambio de calor. También se pretende mejorar la eficiencia del sistema mediante un intercambiador de calor tipo serpentín colocado dentro del tanque de almacenamiento de agua.

En años recientes se ha trabajado en todo el mundo para un mejor aprovechamiento del calor, sea mediante el uso de recuperadores de calor o mediante la mejora en la transferencia de calor, tanto en intercambiadores de calor como en los colectores solares. Como fluido de trabajo se utilizan nanopartículas suspendidas en un líquido base para aumentar la transferencia de calor y así la eficiencia del intercambiador de calor o colector solar. Estos fluidos con nanopartículas sólidas suspendidas (metálicas o no metálicas) se denominan “nanofluidos” y poseen mejor conductividad térmica, mayor viscosidad y, por consiguiente, mejoran la transmisión de calor. Los nanotubos de carbono representan una buena opción como lo reporta Natarajan et al [2], quien utiliza MWCNT (Multiwalled Carbón Nanotubes) a fracciones volumétricas del 1% y reporta un aumento en la conductividad térmica del agua en 40% y del etilenglicol en 30%.

Por otro lado, los intercambiadores de calor son dispositivos que facilitan el flujo de energía térmica entre dos o más fluidos que se encuentran a diferentes temperaturas, sin permitir que los fluidos se mezclen. Los colectores solares son un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la radiación solar en energía interna de un medio de transporte. También el intercambiador de calor utilizado en el termotanque constituye un ejemplo de intercambio de energía térmica entre el nanofluido y el agua. El colector solar motivo de este trabajo es un colector solar estacionario, es decir, permanece fijo porque no sigue la trayectoria del sol.

Debido a que la tecnología actual facilita la producción de partículas nanométricas, en los últimos años ha crecido el interés de dispersar nanopartículas en fluidos para mejorar su capacidad de transferir calor. Los nanofluidos son apropiados para aplicaciones de transferencia de calor, ya que son más estables, poseen mayor conductividad térmica y no producen mayores caídas de presión comparadas con otras suspensiones. Debido a que la conductividad térmica es uno de los parámetros más importantes para mejorar la transferencia de calor, se han realizado diversos estudios sobre el aumento de esta conductividad en los nanofluidos. La mayoría de los experimentos realizados han arrojado resultados positivos con el aumento de la conductividad térmica usando nanopartículas. Farajollahi et al [3] realizaron estudios en un intercambiador de calor, en donde utilizaron nanofluidos de óxido de aluminio y óxido de titanio en base agua. Las mejoras para el coeficiente de transferencia de calor global con 0.3%, 0.75%, 1% y 2% en volumen para Al2O3/agua fueron del 14%, 16%, 15% y 9%, respectivamente. De igual manera con 0.15%, 0.3%, 0.5% y 0.75% en volumen para TiO2/agua sus correspondientes mejoras fueron del 11%, 24%, 16% y 13%, respectivamente. Tyagi et al [4] reportaron un aumento del 10% en la eficiencia del colector solar de absorción directa utilizando una suspensión de nanopartículas de aluminio y agua (0.8% fracción en volumen). Demir et al [5], por otro lado, investigaron el aumento de transferencia de calor con partículas de TiO2 y Al2O3 en un intercambiador de calor de doble tubo a contraflujo, simulando con varias concentraciones en volumen y llegaron a la conclusión de que el uso de nanofluidos incrementa significativamente la transferencia de calor incluso para fracciones en volumen relativamente pequeñas. Otanicar et al [6] reportaron resultados experimentales y numéricos de placas absorbentes utilizando nanofluidos de grafito (0.1% fracción en volumen) y plata (0.25% fracción en volumen), demostrando mejoras del 3% y 5%, mientras que Yousefi et al [7] demostraron experimentalmente que usar nanofluidos de Al2O3 (0.2% y 0.4% en peso.) incrementa la eficiencia de un colector solar en 28%. Por su parte Michael et al [8] muestran que al usar nanofluidos de Oxido de cobre (CuO) en una concentración de 0.05 % en un colector solar, la eficiencia aumenta en un 22 %, mientras que Muhammad et al [9] y Suganthi [10] muestran que al usar nanofluidos de óxido de Zirconio (ZrO_2), la conductividad térmica del fluido de trabajo en colectores solares en un 2.2 %. Finalmente, Velàzquez y Salgado [11] utilizan una nueva metodología de recubrimiento de cobre con aldehídos, que también se concretara en este proyecto y mejora la eficiencia del colector solar.

Hay un enorme rango de aplicaciones de esta tecnología de colectores solares, dependiente del país que se analice, que van de acuerdo a las nuevas tendencias en el uso de energías renovables y de acuerdo a los trabajos de investigación dedicados a la utilización de nuevo materiales en películas de cubiertas, a la óptica de las mismas, a la utilización de recubrimientos y aislamientos térmicos, y al uso de nanofluidos para mejorar, en general, su eficiencia.

2. DESARROLLO

El presente colector es un modelo compacto utilizado únicamente como sistema experimental cuyas dimensiones son 20 x 40 x 8 cm, y es conectado a un tanque de almacenamiento de agua de 15 litros. Consta de una cubierta de vidrio, tubos absorbedores de cobre con aletas y recubrimiento selectivo, base de madera, y marco de aluminio. La figura 1 muestra un diagrama esquemático del colector con sus dimensiones e instrumentación, mientras que la figura 2 muestra el colector real.

Como puede observarse en la figura 1, hay varios termopares que se instalaron para medir la temperatura en diferentes puntos dentro del sistema

con el fin de realizar los cálculos que caractericen al equipo. Cubierta, tubos, y entrada y salida de agua en el colector, son los 4 puntos donde se instalan los termopares. Un radiómetro externo también fue colocado para medir la radiación térmica.

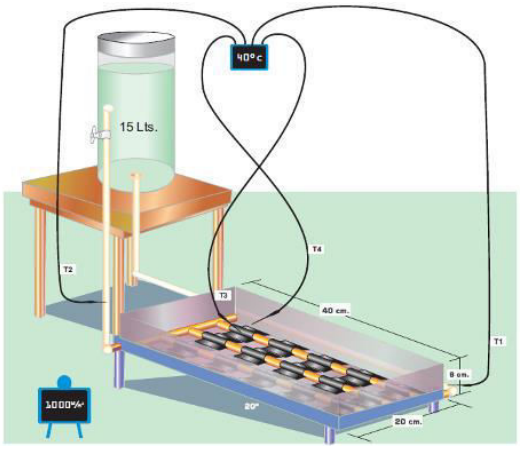


Figura 1. Diagrama esquemático del colector solar para 15 litros de agua.



Figura 2. Colector solar con tanque de almacenamiento y recipiente con nanofluido.

2.1 Colector con agua y sin intercambiador de calor

Los cálculos realizados en la primera etapa del proyecto a partir de estas temperaturas, para caracterizar el colector, son los siguientes:

La eficiencia térmica del colector, que es la relación entre el calor útil absorbido por el agua o nanofluido y el calor solar transmitido al colector:

$$\eta = \frac{Q}{S\,A_c} \tag{1}$$

Siendo Q_u el calor útil S la radiación por unidad de área que incide sobre el área transversal A_c del colector.

El calor útil trasmitido al el fluido de trabajo se obtiene mediante:

$$Q_u = A_C[S - U_L(T_p - T_a)] \tag{2}$$

Siendo U_L el coeficiente global de transferencia de calor, T_p la temperatura de la pared del tubo absorbedor y T_a la temperatura del ambiente.

Mediante la ecuación proveniente de la primera ley de la termodinámica, donde el calor trasmitido al fluido es igual a cambio de entalpia; se obtiene el flujo másico mf:

$$Q_u = m_f Cp_f \left(\frac{dT}{dt}\right) \tag{3}$$

Siendo Cp_f el calor específico del fluido, y (dT/dt) el cambio de temperatura entre la salida y entrada del colector respecto al tiempo.

El factor de remoción de calor que es el calor útil que se obtiene en el colector respecto al que se obtendría si su superficie se encontrara a la temperatura del fluido de entrada, se calcula mediante:

$$Fr = \frac{m\,C_p\,(T_s - T_e)}{Ac\left(S - U_L(T_e - T_a)\right)} \tag{4}$$

Siendo T_s y T_e las temperaturas de salida y entrada al colector, respectivamente.

2.2 Colector con nanofluido e intercambiador de calor

Por otro lado, el intercambiador de calor que se inserta en el tanque de almacenamiento es diseñado de acuerdo a la ecuación de intercambio de calor

entre el intercambiador y el agua almacenada en el tanque, es decir:

$$Q = U_i \pi D L \Delta T_{Ln} \quad (5)$$

Siendo U_i el coeficiente de transferencia de calor del intercambiador, D el diámetro externo del tubo del intercambiador, L la longitud total del tubo utilizado para este intercambiador, y ΔT_{Ln} la diferencia media logarítmica entre las temperaturas de entrada y salida del intercambiador y la temperatura del agua del tanque de almacenamiento. A partir de esta ecuación se obtiene la longitud L del intercambiador de calor sustituyendo Q por el calor útil. La figura 3 muestra el intercambiador de calor colocado dentro del tanque de almacenamiento de agua.



Figura 3. Intercambiador de calor en tanque de almacenamiento.

Finalmente, se preparó la solución de óxido de zinc a tres diferentes concentraciones, 0.1%, 0.2% y 0.3%, que se utilizaron para para caracterizar el colector y obtener su eficiencia. Cada nanofluido se caracterizó para obtener sus propiedades térmicas como conductividad térmica, capacidad térmica específica, densidad y difusividad, que son utilizadas en los cálculos de transmisión de calor.

La preparación de las soluciones anteriores se lleva a cabo mediante un procedimiento realizado en laboratorio. Inicialmente se pesan los gramos necesarios de nano partículas que se utilizarán de acuerdo a la concentración deseada de nano fluido, colocándolos en un matraz volumétrico con el agua necesaria, se mezclan en botellas ámbar, y se colocan en el ultrasonido en un lapso de tiempo determinado para homogeneizar la mezcla. Finalmente se procede a realizar la evaluación de sus propiedades térmicas mediante técnicas fotoacústicas.

3. RESULTADOS

La tabla 1 muestra distintos datos de propiedades y materiales utilizados para los cálculos de caracterización del colector solar. Se muestra también la inclinación característica del colector, muy similar a la latitud del lugar donde fue colocado, para recibir la mayor cantidad de radiación térmica.

Tabla 1-Caracteritícas del Colector

Absortancia cobre	0.85
Transmitancia vidrio	0.87
Reflectancia vidrio	0.1
Área Colector	0.1862
Inclinación	20
Material Termotanque	Plástico
Aislamiento Termotanque	Espuma poliuretano
Unión tubo – Aleta	Soldadura tig cobre

Las figuras 4 y 5 muestran la evolución de las mediciones de temperaturas en el lapso de horas críticas a lo largo dos días típicos fríos del mes crítico de noviembre. Uno de estos días es continuación del otro después de 5 días transcurridos en funcionamiento continuo. Puede observarse un comportamiento similar a lo largo de ambos días. En los cálculos de eficiencia existe el mismo comportamiento evolutivo, es decir, la eficiencia aumenta a lo largo del día, sin embargo, se tiene mejor eficiencia en el día en que las temperaturas del agua son más bajas, lo que significa que la eficiencia depende de la diferencia de temperaturas del agua a lo largo del día, entre mayor sea la diferencia, hay mejor eficiencia y viceversa. Son las temperaturas de entrada (Te) y salida (Ts) de agua del colector, asì como las temperaturas de la placa absorbedora (Tp) o aleta soldada a los tubos conductores de agua, y la temperatura del vidrio (Tv) protector del colector, las que fueron medidas y mostradas en las figuras mencionadas.

Por otro lado, la figura 6 muestra la radiación solar durante dos días típicos de dos meses críticos, medida sobre la superficie inclinada del colector.

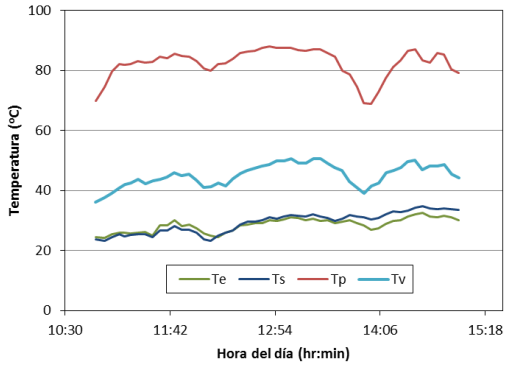


Figura 4. Evoluciôn de temperaturas en colector para el 14 de noviembre.

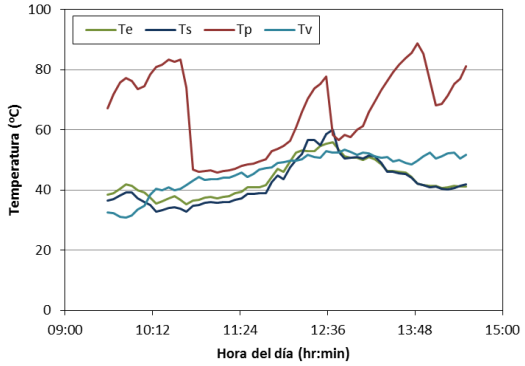


Figura 5. Evolución de temperaturas en colector para el 19 de noviembre.

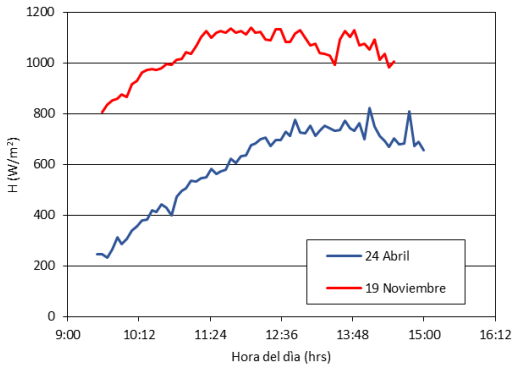


Figura 6. Radiaciôn medida en días típicos de dos meses críticos

Se puede apreciar que hay mayor actividad de radiación en el mes frío de noviembre cercano al invierno en comparación con el mes caliente de abril cercano a la primavera, a pesar de que las temperaturas muestran lo contrario.

La evolución de temperaturas en el mes caliente crítico se muestra en la figura 7. Se puede apreciar la diferencia respecto al mes crítico opuesto frío.

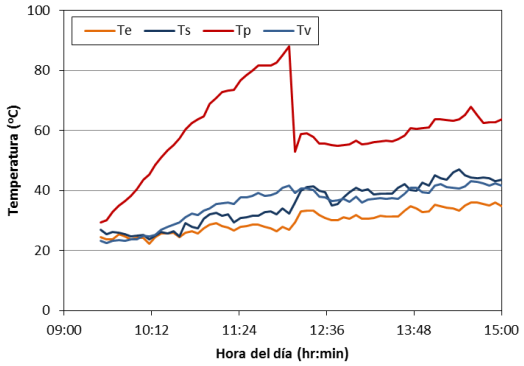


Figura 7. Evolución de temperaturas en colector para el 24 de abril

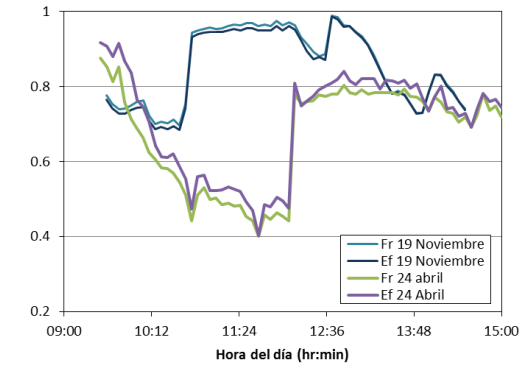


Figura 8. Eficiencias térmicas (Ef) y Factores de remoción de calor (Fr) en meses críticos.

La figura 8 muestra las eficiencias térmicas y los factores de remoción de calor en ambos meses críticos. Es evidente que es más eficiente el colector en el mes frío en comparación con el mes caliente. Esto se debe principalmente a que durante el mes frío se recibe mayor cantidad de radiación térmica, pero principalmente a que el colector tiene un proceso evolutivo en el que tiende a estabilizarse o tiende a llegar a un estado

permanente a lo largo del día al ir aumentando su temperatura. Dicha estabilización conduce a tener una menor eficiencia térmica debido a que la diferencia evolutiva de temperaturas es más pequeña.

La tabla 2 muestra la eficiencia térmica y el factor de remoción de calor para distintos días durante el año, donde se puede observar que se tiene mejor eficiencia mientras más nos acercamos a los días de verano más calurosos.

Tabla 2. Eficiencias térmicas instantáneas máximas del colector para diferentes días.

Día	Fr	η térmica
16/04/2018	0.58	0.57
16/05/2018	0.6	0.58
24/05/2018	0.7	0.68
16/06/2018	0.7	0.67
24/06/2018	0.7	0.67

Finalmente se agrega el intercambiador y se instala el recipiente con el nanofluido utilizado en el colector. La tabla 3 muestra los datos del intercambiador de calor diseñado mediante el calor útil que debe disiparse hacia el agua del tanque de almacenamiento. Se utilizaron soluciones de Óxido de Zinc como nanofluido para caracterizar el colector. Dichas soluciones fueron preparadas al 0.1, 0.2 y 0.3% como se mencionó en la sección previa.

Tabla 3. Datos del intercambiador de calor instalado dentro del tanque de almacenamiento.

Largo del tubo	4.5	m
Deposito	1.2	litros
Área	0.00042	m^2
Coeficiente global de transferencia de calor	100 [12]	W/m^2 °C

La figura 9 muestra la evolución de las temperaturas de entrada y salida de nanofluido en el colector, la temperatura de la placa de cobre con recubrimiento selectivo, la temperatura de la cubierta de vidrio, y la temperatura ambiente para un día típico del mes de junio, donde se puede observar que el crecimiento de la temperatura es más continuo y la temperatura de la placa metálica es más alta. Puede observarse también en la figura 10 la evolución instantánea de la eficiencia térmica del colector, cuyo valor oscila alrededor de 0.6.

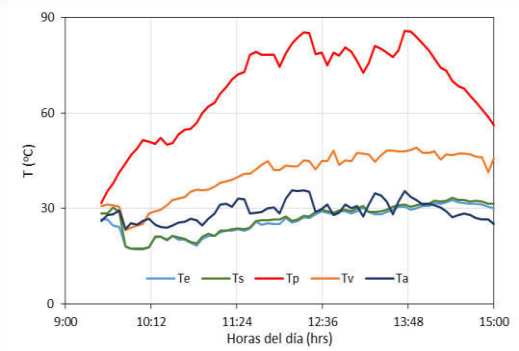


Figura 9. Evolución de temperaturas en colector para el 30 de junio.

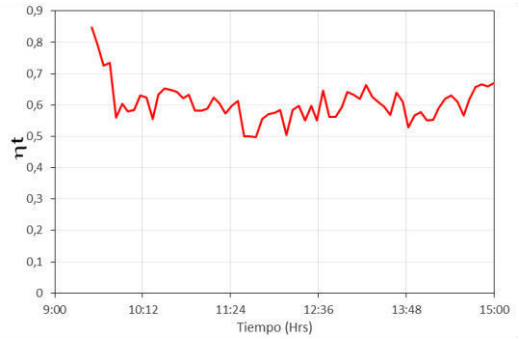


Figura 10. Eficiencia térmica del colector para el 30 de junio

Tabla 4. Eficiencias térmicas promedio y factores de remoción de calor promedio.

Día	Fr	η térmica	Tmáx tanque (°C)
Agua 29/06/2018	0.5	0.46	34.5
0.1 ZnO 30/06/2018	0.62	0.61	40
0.2 ZnO 1/07/2018	0.6	0.52	37
0.3 ZnO 2/07/2018	0.6	0.54	62

La tabla 4 muestra los valores de la eficiencia promedio del colector con nanofluido e intercambiador de calor en comparación con el colector con agua y sin intercambiador de calor, para días típicos de verano. Obviamente se observa que la eficiencia es mayor cuando se tiene el

nanofluido y el intercambiador de calor. También puede observarse que la eficiencia disminuye al aumentar la concentración del Óxido de Zinc, lo cual no es muy congruente con lo que se esperaba. Necesitarían reproducirse las condiciones de un día a otro para poder evaluar la eficiencia con mayor precisión y tener resultados más congruentes; es decir, donde la eficiencia mejore con el uso de una mayor concentración de Óxido de Zinc.

4. CONCLUSIONES

Resultados de la caracterización de un calentador solar con recubrimiento selectivo orgánico, y con nanofluido con intercambiador de calor en el tanque de almacenamiento se ha presentado. El recubrimiento selectivo muestra un mejor funcionamiento respecto a un calentador sin él. La caracterización nos muestra que funciona mejor en días calurosos y soleados que en días fríos o nublados como el mes de abril y junio. Las pequeñas diferencias de congruencia en resultados entre un mes y otro son debidas a factores climatológicos repentinos como lluvias o días nublados. Se observa que si se tiene un mejor aislamiento en el tanque de almacenamiento, el agua puede conservarse a mayor temperatura e, independientemente de la eficiencia, se pueden lograr mayores temperaturas al día siguiente, aun teniendo un sistema sin intercambiador de calor. El sistema con intercambiador de calor y el nanofluido presenta el mismo comportamiento que sin él, pero su funcionamiento es mejor y más estable debido a que el incremento de temperaturas también es más estable, es decir, sin cambios repentinos de temperatura, lo cual hace también más eficiente el colector. La caracterización con el nanofluido muestra, por consiguiente, que se tiene también mejor eficiencia respecto al colector sin el nanofluido, a pesar del cambio en las condiciones climáticas que originaron una pequeña diferencia entre una concentración y otra del óxido de zinc. Es posible entonces tener temperaturas más estables y reducir pérdidas de calor en días nublados cuando se tiene un colector funcionando con un nanofluido.

REFERENCIAS

1. Duffie, J. A., Beckman, W. A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*, JohnWiley & Sons, New York, NY, USA.
2. Natarajan T. S., Lee J. Y., Bajaj H. C., Tayade R. J. (2016). “Synthesis of multiwall carbón nanotubes/TiO2 nanotube composites with enhaced photocatalytic decomposition efficiency”. Catalysis Today, Vol. 282.
3. Farajollahi, B., Mohammad H., Seyed G. (2010). “Heat Transfer of nanofluidsin a shelland tube heat exchanger”. Int. JHMT.
4. Tyagi H., Phelan P., Prasher R. (2009). “Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector”. Solar Energy Engineeering, Vol. 131, No. 4.
5. Demir H., Dalkilic A. S. (2010). “A numerical investigation of nanofluids forced convection flow in a horizontal smooth tube”. Prooc. 14th Int. Heat Transfer Conf. Vol 6, ASME.
6. Otanicar T. P., Phelan P. E., Prasher R. S., Rosengarten G., Taylor R. A. (2010). “Nanofluid based direct absorption solar collector”. J. Renewable Sustainable Energy. Vol. 2.
7. Yousefi T., Zinadini S. (2012). “An experimental investigation on the effect of Al2O3-H2O nanofluid on the efficiency of flat plate solar collector”. Renewable Energy, Vol. 39 No. 1.
8. Michael J. J., Iniyan S. (2015). “Performance of copper oxide/ water nanofluid in a flat plate solar water heater under natural and forced circulations”. Energy Conversion and Management. Vol. 95.
9. Muhammad M. J., Muhammad I. A., Sidik N. A. C., Muhammad Y. W., Mamat R., Najafi G. (2016). “The use of nanofluids for enhancing the thermal performance of stationary solar collectors: A review”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 66.
10. Suganthi K. S., Rajan K. S. (2915). “Improved transient heat transfer performance of ZnO – Propylene glycol nanofluids for energy management”. Energy Conversion Management. Vol. 90.
11. Velázquez-Olvera, S., Salgado-Zamora, H., Velázquez-Olvera, Joaquin, Barrera-Calva, Enrique y Pérez-González, C. (2014). “Proceso de electrodeposición de estaño en cobre con agentes reductores orgánicos” Patente MX/E/2014/025083.
12. Kern, D. Q. (1950). *Process Heat transfer*. McGraw-Hill Inc Ed.

BANCO DE INSTRUMENTACIÓN PARA EL ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES PROVENIENTES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

INSTRUMENTATION BANK FOR THE CONDITIONING AND ACQUISITION OF SIGNALS FROM AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Juan David Ramírez, Juan Camilo Mejía Hernández, Héctor Fabio Quintero, Edison de Jesús Henao Castañeda, Carlos Alberto Romero Piedrahita y Wilson Pérez Castro

Universidad Tecnológica de Pereira, Ingeniería Mecánica
Carrera 27 #10-02, Pereira, Risaralda, Colombia.
(57) (6) 3137124
E-mail: {juandaviramireza, j.mejia1, hquinte, edisonhenao, cromero, wilsonmeca}@utp.edu.co.

Resumen: Desde la invención, el Motor de Combustión Interna (MCI) se utiliza en una amplia gama de aplicaciones automovilísticas, aeronáuticas, ferroviarias entre otras. Debido a lo anterior, se han desarrollado diversas técnicas de monitoreo, diagnóstico y mantenimiento para los MCI, las cuales tienen como objetivo mantenerlos en buen estado para reducir costos de reparación, garantizar la disponibilidad y eficiencia. Generalmente, las técnicas de mantenimiento de los MCI se basan en el análisis de señales intrínsecas provenientes de los mismos (temperatura, vibraciones, gases, etc.) y la captura de estas conlleva un enorme trabajo de instrumentación. En este trabajo se presenta detalladamente un banco de instrumentación para la captura de señales proveniente de un motor de combustión interna. Las señales capturadas del MCI son temperatura (bloque, aceite, escape y admisión), vibraciones en todos los ejes, presión en la cámara de combustión, posición angular, velocidad y carga. Cada señal fue analizada y acondicionada para ser capturada por el sistema de adquisición de la National Instruments (NI), con el objetivo de cumplir con estándares de comparación establecidos en el estado del arte. Cabe resaltar que, gracias a la metodología implementada todas las señales se capturan de manera simultánea, lo cual permite realizar correlaciones entre las mismas en el tiempo y así encontrar información relevante. Fruto de este trabajo, se presenta un conjunto de señales provenientes de MCI que generalmente no son tomadas en cuenta para realizar diagnósticos y muchos menos analizadas de manera conjunta. Además, se exhibe una base de datos con todas las señales cambiando las condiciones de trabajo (velocidad y carga) del MCI, la cual puede ser utilizada para casos de estudio.

Palabras clave: Motor de Combustión Interna, Técnicas de monitoreo, Instrumentación, Condiciones de trabajo.

Abstract: Since the invention, the Internal Combustion Engine (ICM) has been used in a wide range of automotive, aeronautical and railway applications, among others. Due to the above, several monitoring, diagnosis and maintenance techniques have been developed for the MCI, which aim to keep them in good condition to reduce repair costs, guarantee availability and efficiency. Generally, the MCI maintenance techniques are

based on the analysis of intrinsic signals coming from them (temperature, vibrations, gases, etc.) and the capture of these involves an enormous work of instrumentation. In this article, a robust and efficient instrumentation bank for the capture of signals coming from an internal combustion engine is presented in detail. The signals captured from the MCI are temperature (block, oil, exhaust and intake), vibrations on all axes, pressure (combustion chamber and intake air), angular position, speed and load. Each signal was analyzed and conditioned to be captured by the acquisition system of the National Instruments (NI), in order to comply with standards of comparison established in the state of the art. It should be noted that, thanks to the implemented methodology, all the signals are captured simultaneously, which allows to make correlations between them over time and thus find relevant information. As a result of this work, we present a set of signals from MCI that are not generally taken into account to make diagnoses and much less analyzed jointly. In addition, a database with all the signals is displayed, changing the working conditions (speed and load) of the MCI, which can be used for case studies.

Keywords: Internal combustion engine, monitoring techniques, instrumentation, working conditions.

1. INTRODUCCIÓN

En la mayor parte de las aplicaciones, los motores de combustión interna (MCI) trabajan bajo condiciones operativas variables. Debido a esto, se han desarrollado diferentes ambientes controlados para realizar pruebas en los MCI, en las cuales se pueda registrar y almacenar información relevante que permita identificar las mejores condiciones de operación [1]. Un MCI que trabaja en buenas condiciones de operación adquiere ventajas como reducción de combustible, máximo aprovechamiento de la potencia y una reducción de costos de reparación [2]. Dichas condiciones, son una aproximación de las configuraciones reales que debe tener un MCI para funcionar de manera óptima en ambientes no controlados. Este enfoque se conoce como mantenimiento preventivo y se realiza en la actualidad mediante una serie de rutinas de inspección realizadas a unos intervalos de tiempo determinados.

Es corriente en la literatura la publicación de diferentes estudios dedicados a la búsqueda de las condiciones óptimas de los MCI. Así, Chaican y Saleh [3] buscan relaciones aire-combustible óptimas para diferentes combustibles en un motor de cuatro tiempos; Rodríguez [5] y Yousufuddina [4] realizaron búsquedas de variaciones de combustibles para encontrar las mayores compresiones en cámara. Camarillo [6] y Kumar [7] comparan diferentes combinaciones de combustible para buscar los mejores parámetros de par y potencia efectiva. Sin embargo, la mayoría de los trabajos mencionados usan una pequeña cantidad de señales, lo cual omite correlaciones de fenómenos físicos del motor que pueden ayudar a encontrar de manera más eficiente los parámetros óptimos para el MCI. En este trabajo se presenta un robusto banco de instrumentación para el acondicionamiento y adquisición de múltiples señales provenientes de un motor MCI. Los sensores, circuitos de acondicionamiento, sistemas de adquisición y protocolos de captura fueron escogidos específicamente para lograr una correcta recolección de la información que puede ofrecer los fenómenos físicos que posee el motor.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el banco de instrumentación para la captura de señales provenientes de un MCI. Luego, en la sección 3 se especifica todos los protocolos que se usaron para la creación de una base de datos fruto de esta investigación. Por último, las conclusiones se describen en la sección 4.

2. BANCO DE INSTRUMENTACIÓN

En esta sección se detalla un Banco de Instrumentación (BI) para el acondicionamiento, adquisición y almacenamiento de diferentes señales provenientes de un MCI. Todo el sistema está detallado en la figura 1.

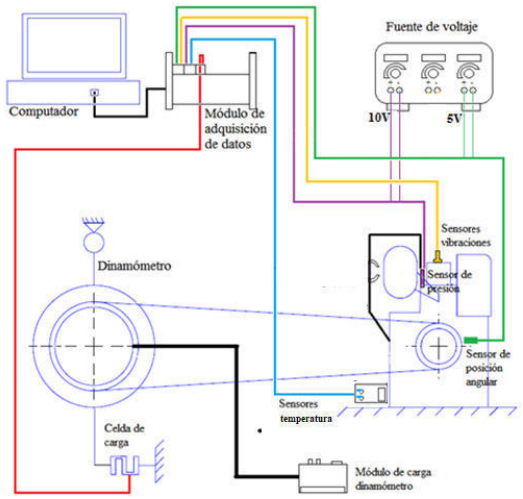


Figura 1. Banco de instrumentación para la captura de señales provenientes de un MCI

El BI de la figura 1 se compone de una serie de sensores y acondicionamientos para la captura de temperatura (bloque, aceite, escape y admisión), vibraciones en todos los ejes, presión en cámara de combustión, posición angular, velocidad y carga. Dichas señales son adquiridas por varias tarjetas de alta resolución de la National Instruments (NI), las cuales fueron escogidas basándose en las características intrínsecas de los sensores y el fenómeno físico. Luego, se sincronizan todas las tarjetas mediante un chasis de la NI y se crean los protocolos de adquisición usando la herramienta de desarrollo Matlab.

2.1 Temperatura

La temperatura de un MCI es bastante elevada en diferentes partes del mismo, por lo cual se requirió un tipo de sensor robusto y resistente. Para esta aplicación se usaron diferentes termocuplas ubicadas en puntos estratégicos del motor. La primera de tipo K está en la admisión, la cual sirve para identificar la energía calórica que puede ofrecer el combustible. La segunda tipo K, está ubicada en bloque y permite monitorear la temperatura del MCI al generar el movimiento. La tercera tipo J, posicionada en el cárter de aceite para vigilar variaciones importantes de lubricación. La última de tipo K, ubicada en el escape y mide la temperatura de los gases expulsados por el MCI. Un diagrama de las ubicaciones de las termocuplas se aprecia en la figura 2.

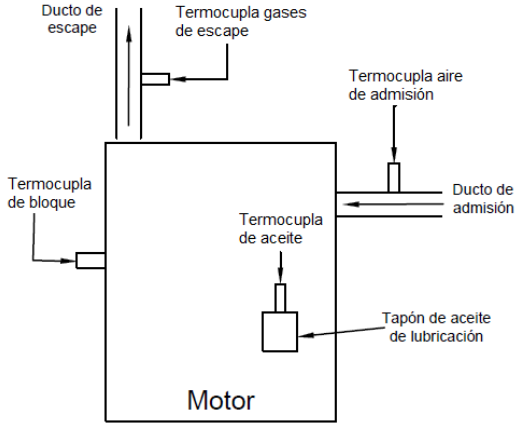


Figura 2. Termocuplas ubicadas en el MCI

Las señales de las cuatro termocuplas son adquiridas por la tarjeta 9211 de la NI, la cual acondiciona dependiendo del material que se especifique en el protocolo de captura.

2.2 Vibración

Con el fin de adquirir señales de vibraciones en el motor, se ubicaron tres placas planas de acero en los diferentes ejes, con el objetivo de proporcionar información de todos los desplazamientos que sufre el MCI. Los sensores usados son de la marca CTC modelo AC102-1A con sensibilidad 100mV/g y sus ubicaciones se pueden apreciar en la figura 3.



Figura 3. Ubicación de los sensores de vibración

Las vibraciones mecánicas se usan en una amplia gama de diagnósticos debido a que poseen mucha información relevante de los sistemas. Por lo tanto, se implementaron en todos los ejes del MCI. En el eje X se capturan vibraciones frontales, en el eje Y vibraciones verticales y en el eje Z vibraciones laterales. El sensor que más información relevante contiene es el ubicado en el eje Y, puesto que va en el mismo sentido que el movimiento del pistón

2.3 Presión

En un MCI que trabaja en óptimas condiciones, la mezcla de combustible y aire se debería quemar de forma uniforme y progresiva, puesto que una detonación violenta de la mezcla provoca un estado de marcha desigual. Dicho fenómeno puede monitorearse en la cámara de combustión, por lo cual se implementó un sensor para la medición de la presión. La implementación comenzó con una modificación de la culata del motor y luego el posicionamiento de un sensor Optrand D822J6-SP, el cual se apreciar en la figura 4.

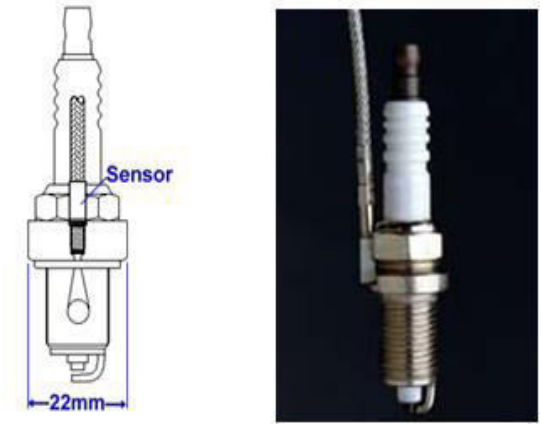


Figura 4. Sensor de presión Optrand D822J6-SP utilizado en cámara de combustión.

El sensor es embebido en la bujía y permite observar la variación se presión e identificar comportamientos anormales como combustiones espontáneas de la mezcla que queda en la cámara y que pueden tener repercusiones térmicas en el desempeño térmico del motor y del sistema de refrigeración, ya que este podría no alcanzar a disipar suficientemente todo el calor transferido a través de las paredes, causando calentamientos excesivos del MCI.

2.4 Velocidad y posición angular

En la polea ubicada en el eje de salida del motor, se instaló una rueda dentada (encóder) para medir la posición angular de cigüeñal y se adhirió una cinta reflectiva para medir la frecuencia de giro con un tacómetro digital. La rueda dentada instalada con este propósito es fónica 60-2, lo cual indica que, a la rueda original de 60 dientes, se le retiran dos (2) con el fin de ubicar cada revolución gráficamente. Luego, se instaló un sensor de efecto Hall, el cual mide campo magnético o corriente para determinar la posición angular del cigüeñal mediante pulsos creados por un voltaje proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. El posicionamiento del sensor se puede ver en la figura 5.

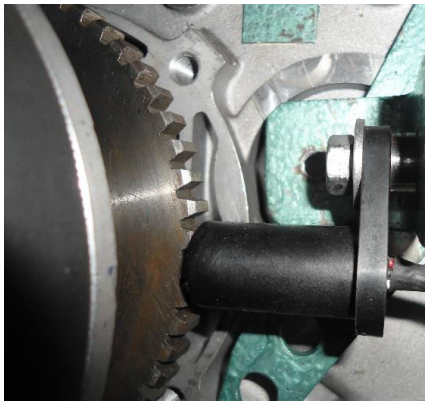


Figura 5. Sensor de posición efecto Hall instalado en el motor del banco de pruebas

El sensor permite apreciar una señal cuadrada, la cual cambia de valor cada que un diente se acerca. Dicha señal y la frecuencia de muestreo de la tarjeta NI permite calcular en un espacio de tiempo la revoluciones por minuto del MCI.

2.4 Carga

La carga del motor se modifica usando un dinamómetro de “Corrientes de Eddy”, el cual se puede apreciar en la figura 6. En su principio de funcionamiento se utiliza la inducción electromagnética para crear el fenómeno conocido como corriente de Foucault, creando una serie de resistencias, aprovechadas para frenar el motor. Su conexión con el motor se visualiza en la figura 7.



Figura 6. Dinamómetro CFK-200

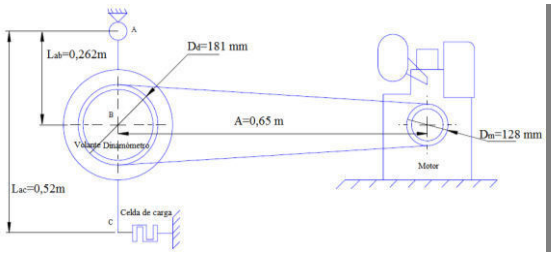


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del motor y el dinamómetro

Gracias a este dinamómetro se puede variar y calcular la carga a la que está sometido el MCI. Lo anterior se logra midiendo la deformación en una celda compuesta por 4 galgas extensiométricas y acondicionadas con un puente de Wheatstone. La señal resultante es la fuerza de oposición del dinamómetro al motor y se expresa en gramos.

2.5 Sistema de adquisición National Instruments

Para la adquisición de las señales provenientes del MCI se utilizaron diferentes tarjetas de la NI escogidas basándose en las características de los sensores y el fenómeno físico. El sistema de adquisición para cada señal se puede apreciar en la figura 8.

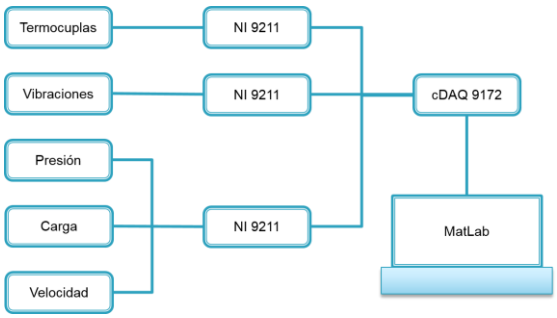


Figura 8. Sistema de adquisición del BI

Para las termocuplas se usó la tarjeta NI 9211 (4 muestras por segundo). Las vibraciones usaron la tarjeta NI 9234 (51200 muestras por segundo por canal). La presión, la carga y la posición angular se adquirieron con la tarjeta NI 9222 (51200 muestras por segundo por canal). Luego, las tres tarjetas se ubicaron en el chasis cDAQ-9172 y se estableció el protocolo y configuraciones en la herramienta de desarrollo MatLab.

3. BASE DE DATOS

La base de datos se obtuvo adquiriendo señales provenientes de un motor de combustión acoplado al dinamómetro para ser probado bajo una metodología factorial. El motor es de encendido por compresión es un CHANGFA 186 F, es normalmente utilizado en obras civiles, generación de energía eléctrica y en labores agrícolas. Dicho motor se puede apreciar en la figura 9.



Figura 9. Motor CHANGFA 186 F

El MCI mencionado posee la ventaja de estar modificado para variar de manera controlada diferentes factores para crear una base de datos robusta. Los factores de estudio elegidos fueron:

- Velocidad en RPM:
  - 1200
  - 1800
  - 2400
  - 3000
  - 3600
- Nivel de carga (Amperios)
  - Baja
  - Media
  - Alta

Se utilizarán un conjunto de 15 experimentos variando los factores de estudio, con el objetivo de

evaluar el desempeño del motor usando un solo tipo de combustible. La matriz de experimento utilizada se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de experimento

Experimento		
Carga	RPM	Tratamiento
Baja (0,5 A)	1200	1
	1800	2
	2400	3
	3000	4
	3600	5
Media (1 A)	1200	6
	1800	7
	2400	8
	3000	9
	3600	10
Alta (1,5 A)	1200	11
	1800	12
	2400	13
	3000	14
	3600	15

La base de datos se adquirió manejando una homogeneidad en cuanto a frecuencia de muestreo y duración. Para las temperaturas 4 muestras por segundo y para las demás señales 51200 muestras por segundo. Las figuras 10-14 son una muestra de los registros obtenidos durante las pruebas.

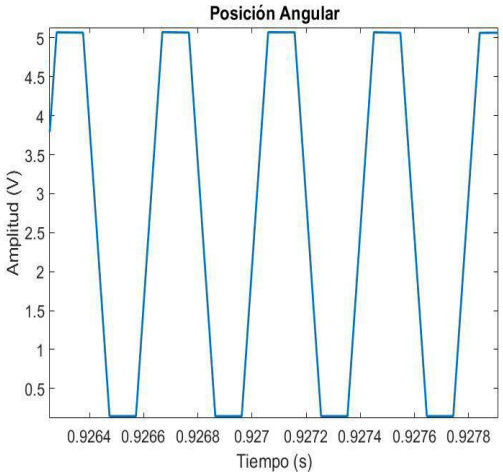


Figura 10. Señal posición angular

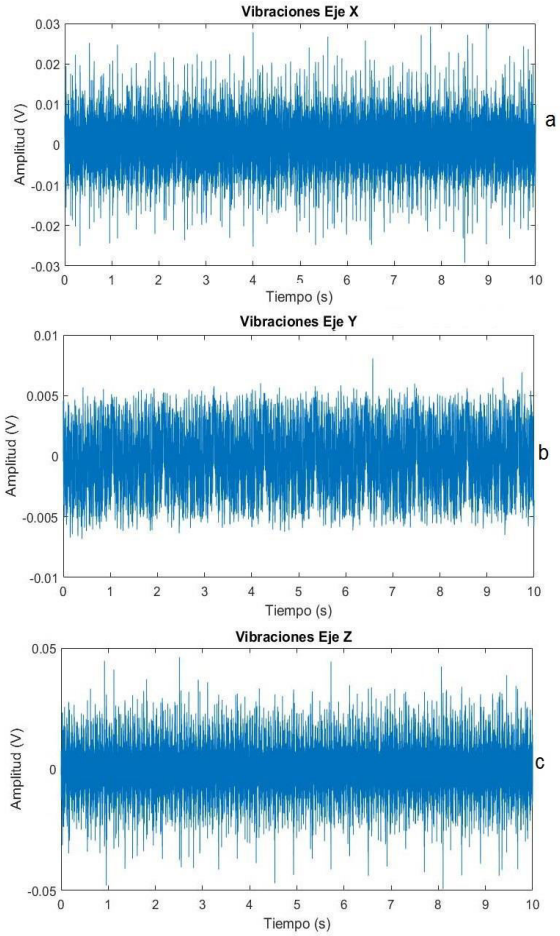


Figura 11. Señales de vibración. a) Eje X. b) Eje Y. c) Eje Z

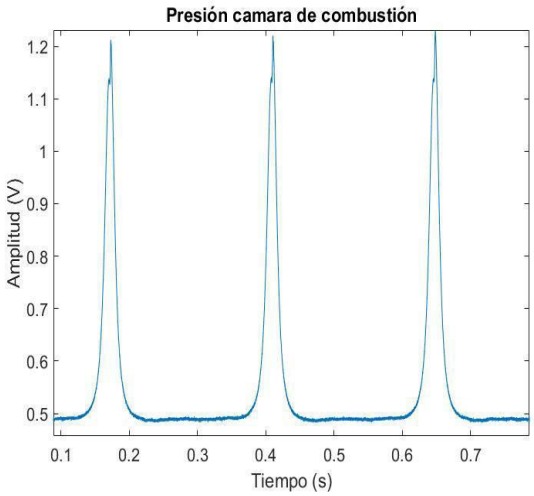


Figura 12. Señal de presión

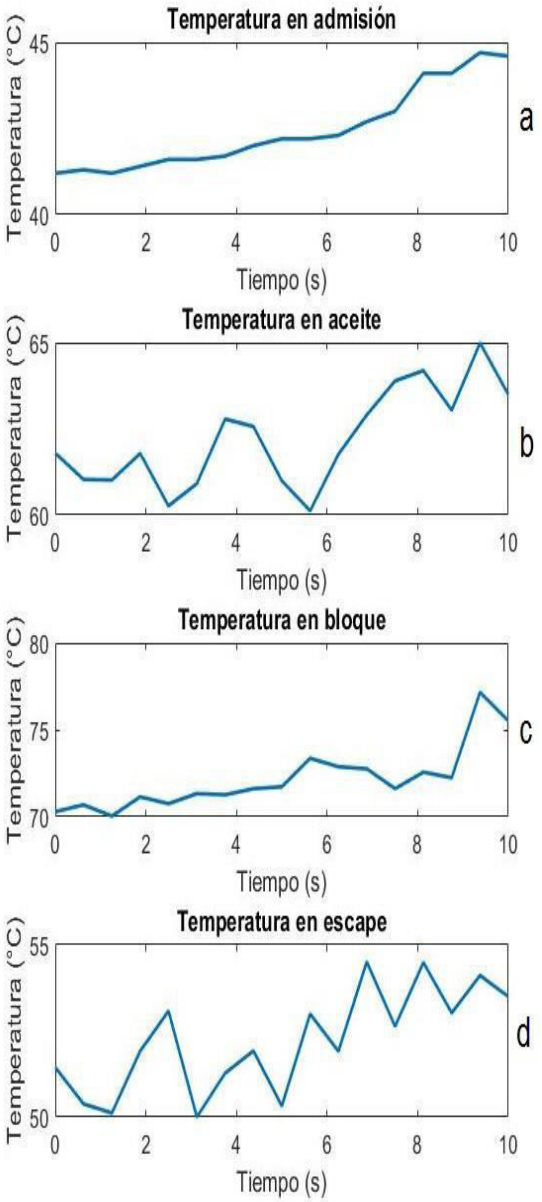


Figura 10. Señales de temperatura. a) Admisión. b) Aceite. c) Bloque. d) Escape.

Las señales fueron adquiridas de manera sincronizada y se logra capturar el fenómeno físico garantizando la recolección de la información que contiene acerca del MCI.

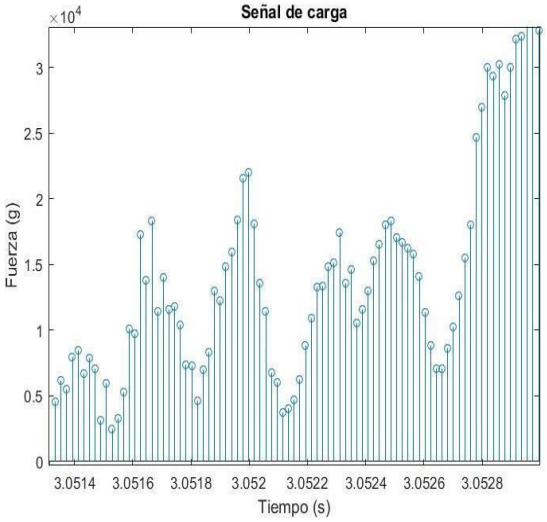


Figura 14. Señal de carga

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un robusto BI para el acondicionamiento y adquisición de múltiples señales provenientes de un motor MCI. Las señales capturadas son temperatura (bloque, aceite, escape y admisión), vibraciones en todos los ejes, presión en la cámara de combustión, posición angular, velocidad y carga. Las señales son capturadas con sistemas de adquisición de la NI, con el objetivo de tener garantías de acondicionamiento y frecuencia de muestreo. El BI logra capturar todos los fenómenos físicos de manera sincronizadas y se pueden relacionar entre sí para encontrar las mejores condiciones de trabajo del MCI. Gracias a este BI se creó una base de datos variando las condiciones de trabajo del MCI para ser utilizada como caso de estudio. Un primer trabajo futuro de esta investigación es la instrumentación de otras señales del MCI como presión del múltiple de entrada y salida, emisiones de gases, punto muerto superior y opacidad. Por último, se espera implementar diferentes metodologías de análisis de señales para encontrar patrones dinámicos que infieren las condiciones óptimas de trabajo.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Maestría en Ingeniería Eléctrica y a la Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira por su

apoyo a lo largo de la investigación. Además, queremos agradecer a COLCIENCIAS por apoyar el proyecto titulado: "Desarrollo de un sistema de monitoreo para el análisis energético y de condición de emisiones en motores de combustión interna diésel con base en técnicas no intrusivas" con el código 1110-776-57801, a través del cual se desarrolló la investigación descrita en este artículo.

REFERENCIAS

[1] S. Jindal, B.P. Nandwana, N.S. Rathore y V. Vashistha. Experimental investigation of the effect of compression ratio and injection pressure in a direct injection diesel engine running on Jatropha methyl ester. Applied Thermal Engineering. Vol 30. 2010. 442-448.

[2] K. Muralidharan, D. Vasudevan. Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends. Applied Energy. Vol. 88. 2010. 3959-3968.

[3] Miqdam T. Chaichan y Adel M. Saleh. Practical investigation of single cylinder spark ignition engine performance operated with various hydrocarbon fuels and hydrogen. Journal of Engineering and Development. Vol. 14, No 2. 2010. 183-197.

[4] Juan Felipe Rodríguez Rueda. Caracterización, puesta a punto y análisis de emisiones generadas en un motor de combustión interna HCCI operado con etanol anhidro (E100) y etanol hidratado (E80). Grupo de investigación en combustibles alternativos, energía y protección del medio ambiente GICAEPMA, Universidad Nacional de Colombia. 2015

[5] Eastern tools & equipment, INC. Air-cooled diesel engine 186F Owner's manual. Disponible en línea en el enlace http://easterntools.com (Verificado septiembre de 2018)

[6] D.C. Rakopoulos, C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, R.G. Papagiannakis, D.C. Kyritsis. Experimental-stochastic investigation of the combustion cyclicvariability in HSDI diesel engine using ethanol–diesel fuel blends. ELSEVIER. Fuel. Vol 87.2008. 1478–1491.

[7] M. Pandian, S.P. Sivapirakasam, M. Udayakumar. Investigation on the effect of injection system parameters on performance and emission characteristics of a twin cylinder compression ignition direct injection engine fuelled with pongamia biodiesel–diesel blend using response surface methodology. Applied Energy. Vol 88. 2011. 2663-2676.

[8] C. Romero, A. Mejía, Y. Carranza. Influence of Ethanol Content, Compression Ratio and Cylinder Head Material on Idling Speed, Warm-Up Time and Emissions of a Non-Road Small Single Cylinder Gasoline Engine. Artículo SAE 2016-32-0055, SAE/JSAE 2016 Small Engine Technology Conference & Exhibition, Charleston, 2016.

PARTE C
Materiales y Procesos de Manufactura

USINAGEM DE RESINA CIBATOOL APLICADA À PRODUÇÃO DE MODELOS

MARCO TIPKOVIC FILHO

***Escola de Engenharia Mackenzie** – IPM,
Rua da Consolação, 930 – CEP 01302-907,
São Paulo, SP, Brasil.
Telefone: +55 (11) 99936-6787
E-mail: kovic@osite.com.br;
mstip@uol.com.br

Abstract: *The polyurethan resins are very well accepted in the market by substituing the conventhional materials used to fabricate models. This paper consists in charactertzing a specific kind of polyurethane resin board, commercially available in the Market as Renshape, from the machining standpoint, that is, verifying how the common machining parameters (cutting speed, feed and depth of cut) influences the roughness and chip formation. The applied methodology was to perform some machining experiments in samples with a particular shape in a CNC turning machine, and measure the roughness and observe the chip's geometry. Such measurements were done for different cutting conditions. Additionally, a strength characterization of the material was conducted obtaining values for ultimate stress and deformation. The modeling board used was the Renshape 440® type. The main resultsallow establishing a range of roughness that can be achieved for the machining conditions tested as well as predict the chip's geometry.*

Keywords: *Renshape, machining tests, roughness, chip geometry, CNC.*

Resumo: As resinas de poliuretano tem tido grande aceitação no mercado em substituição a materiais convencionais na obtenção de modelos. Este trabalho consiste em caracterizar um tipo específico de resina de poliuretano, conhecida no mercado como *Renshape*, do ponto de vista da usinagem, verificando-se como os parâmetros comuns de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) influenciam no acabamento e na formação de cavaco. A metodologia utilizada foi proceder a uma série de ensaios de usinagem de um corpo de prova com geometria específica em um torno CNC, e efetuar um conjunto de medições de rugosidade e observações da forma e tipo do cavaco gerado. Tais medições foram realizadas para diferentes condições de usinagem. Adicionalmente procedeu-se a determinação das propriedades mecânicas básicas do material, como limite de resistência a tração e deformação. A resina utilizada foi uma placa de modelagem Renshape 440. Os resultados dos ensaios permitiram estabelecer uma correlação entre os parâmetros

Palavras-chave: *Renshape*, ensaios de usinagem, rugosidade, forma de cavaco, CNC.

1.INTRODUÇÃO

Durante a última década, tanto a comunidade acadêmica como a industrial, têm dedicado grande esforço no desenvolvimento e caracterização de novos materiais capazes de atender as demandas de produtividade e flexibilidade inerentes aos mercados consumidores atuais, principalmente nas áreas de modelagem e ferramentaria.

Tem-se desenvolvido materiais compósitos, tais como resinas epóxi e poliuretano, as quais podem ser uma alternativa aos materiais tradicionais como madeira e termoplásticos, em diversas aplicações como produzir modelos de estilo, padrão maquetes, gabaritos de aferição e controle, ferramentas protótipo para fundição e vacuum forming, ferramentas para conformação de metais, etc.

A geração destes produtos normalmente é realizada através do uso de máquinas CNC, em processo de usinagem de alta velocidade de avanço (Lanz et al, 2002), e, portanto, se torna necessário prever o comportamento do material face a alteração de parâmetros de processo.

Poucos artigos versam sobre o assunto sendo que estes focam nos compostos de partículas de alumínio misturados de forma aleatória numa matriz de epóxi, conhecido comercialmente como Renshape Express 2000 ® (Lanz et al, 2002; King et al, 2001); porém nenhum dos artigos analisou aspectos de usinabilidade em placas de poliuretano de média e baixa densidade utilizada na geração de protótipos e padrões.

O objetivo principal deste artigo é investigar como os parâmetros de usinagem influenciam no acabamento e na formação de cavaco de amostras torneadas a partir de placas de Renshape 440 ® com altos avanços. Estes dados permitiram identificar as faixas de parâmetros (rotação, avanço de corte e profundidade de corte) que conduzem preferencialmente a cavacos em lascas bem como prever faixas de rugosidade.

2.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados diversos ensaios de torneamento cilíndrico em amostras de placa (Renshape 440 ®) em um torno CNC de pequeno porte utilizando uma ferramenta de metal duro. As propriedades físicas e mecânicas de resina podem ser acompanhadas na Tab. 2. Os parâmetros utilizados nos experimentos foram a rotação, avanço e profundidade de corte os quais foram variados de acordo com os limites especificados pelo fabricante da matéria-prima e restrições do equipamento. Adicionalmente também se incorporou o sentido de orientação das fibras do material como variável. A Tab. 1 mostra os parâmetros utilizados e seus níveis. Os avanços foram estipulados de acordo com as variações sugeridas pelo fabricante. As velocidades típicas de avanço para este material são de 2,5 a 5 m/min.

Tab. 1 mostra os parâmetros utilizados e seus níveis. Os avanços foram estipulados de acordo com as variações sugeridas pelo fabricante. As velocidades típicas de avanço para este material são de 2,5 a 5 m/min.

Tabela 1. Parâmetros utilizados e seus valores.

Parâmetros \ Valores				unidade
Rotação (N)	2000	3000	4000	rpm
Avanço (f)	0,3	0,8	1,6	mm/r
Profundidade de corte (a_p)	1,5	3,0	4,5	mm

Tabela 2. Propriedades Físicas e Mecânicas da Resina

Material	Cor	Densidade	Tensão última a tração	Módulo de Elasticidade
Renshape 440®	Marrom avermelhado	0,55 g/cm^3	1300 psi	105000 psi

Matéria-Prima e Peça

A matéria-prima utilizada no ensaio foi confeccionada em torno convencional, no formato cilíndrico, com ϕ 25,4 x 60 mm e dotada de furo com rosca na face traseira visando posterior fixação na placa do torno CNC através de dispositivo específico. Foram também gerados tarugos no sentido longitudinal e transversal à orientação das fibras da placa de origem, designados, respectivamente pela letra A e B. As fibras de material polimérico se

originam pelo processo de fabricação das chapas, onde o líquido é moldado, curado e posteriormente prensado ou laminado na forma de chapas. A geometria inicial e final da peça, contendo 3 patamares defasados das profundidades de corte da Tab. 1, pode ser vista na Fig. 1. Os diâmetros usinados foram respectivamente de 22,4 mm, 19,4 mm e 13,4 mm de forma a se obter as profundidades de cortes sugeridas.

Torno e Programa CNC

Os ensaios foram conduzidos num torno CNC Mirac PC, de pequeno porte (potência do eixo árvore – 1 CV), dotado de comando Fanuc OT (Fig. 2). Gerou-se um programa CNC padrão, onde foram variados os parâmetros de rotação e avanço, identificados basicamente por S e F, respectivamente. A instrução M00 permite a parada do programa para recolhimento de amostras do cavaco. Utilizou-se uma ferramenta de metal duro com geometria positiva para usinagem de materiais não-ferrosos ISO VCGX 11 02 02 – AL.

```
G21
[BILLET X25.4 Z60
G28 U0 W0
M06 T0404
G99 F0.3 S2000
G50 S2000
M03
G90
(A111
G00 X22.4 Z2
G01 Z-45
G00 X23
G00 Z2
M00 (Para o programa A112
G00 X19.4
G01 Z-30
G00 X20
G00 Z2
M00 (Para o programa A113
G00 X13.4
G01 Z-15
G00 X26
G28 U0 W0
M30
```



Figura 1. Tarugo e peça final do experimento



Figura 2. Programa e Torno CNC

Medição de Rugosidade

A rugosidade de interesse foi avaliada utilizando-se um rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest 301 (Fig.3) devidamente calibrado através de padrões de rugosidade. O aparato de medição está mostrado na Fig. 4, e consta de uma mesa de desempeno, bloco V e grampos de fixação.



Figura 3. Rugosímetro utilizado



Figura 4. Aparato de medição

Caracterização das Propriedades Mecânicas do Material

Ensaios de tração também foram conduzidos para caracterizar as propriedades mecânicas do material, basicamente a tensão última a tração e deformação específica. O corpo de prova foi usinado em um centro de usinagem Triac PC (Fig. 6), comando Fanuc OM, conforme geometria padronizada (Fig. 5) segundo norma ISO R377, utilizando-se uma fresa de topo HSS – 2 cortes – DIN 327B, diâmetro de 10 mm. Os ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios de tração MTS modelo 2 teste com capacidade para 10 kN.



Figura 5. Corpo de prova para ensaio de tração



Figura 6. Usinagem do corpo de prova

3.RESULTADOS

Rugosidade e Formato de Cavaco

No total foram usinadas 18 peças, sendo 9 tipo A e 9 tipo B, de forma a se obter todas as combinações entre os parâmetros envolvidos.

Os resultados principais dos ensaios de rugosidade e formato de cavaco podem ser acompanhados nas Tab. 3 e 4, para as amostras tipo A e B, respectivamente. Os valores de rugosidade também foram convertidos para R_{3z}, parâmetro mais adequado para materiais porosos (Novaski, 1994).

Os valores de rugosidade variaram de 15,79 Ra (79,60 R3z) (f = 0,8 mm/r , N = 3000 rpm e a_p = 3 mm) até 28,46 Ra (87,20 R_{3z}) (f = 0,8 mm/r , N = 2000 rpm e a_p = 3 mm) para as amostras tipo A.

Os valores de rugosidade variaram de 11,84 Ra (88,30 R_{3z}) (f = 1,6 mm/r , N = 3000 rpm e a_p= 1,5 mm) até 28,97 Ra (69,20 R_{3z}) (f = 0,8 mm/r, N = 2000 rpm e a_p = 3 mm) para as amostras tipo B. Já os formatos de cavaco variaram entre de ruptura (pó), passando por pequenas lascas (p. lascas) e em lascas.

Comparando-se a médias das médias observa-se que a rugosidade apresentou-se menor no sentido transversal (tipo B) comparado ao sentido longitudinal (tipo A).

Tabela 3. Resultados de Rugosidade para Amostras tipo A – Sentido

Tabela 3. Resultados de Rugosidade para Amostras tipo A – Sentido Longitudinal

Cortes da matéria-prima na mesma direção das fibras - TIPO (A)					Resultado dos ensaios em Ra. [µm]				Resultado dos ensaios em R3Z. [µm]				
N.P	ID	rpm	Avanço (mm/v.)	Prof. (mm)	Teste 1 (µm) Ra	Teste 2 (µm) Ra	Teste 3 (µm) Ra	Ra (méd)	Teste 1 (µm) R3z	Teste 2 (µm) R3z	Teste 3 (µm) R3z	R3z (méd)	Tipo de Cavaco
	A111	2000	0.3	1.5	20.13	21.16	20.90	20.73	68.30	64.40	61.70	64.80	Ruptura
1A	A112	2000	0.3	3	20.83	19.26	19.52	19.87	81.20	81.90	83.50	82.20	P.Lascas
	A113	2000	0.3	4.5	26.07	23.89	24.05	24.67	72.00	68.00	72.60	70.87	Lasca
	A121	2000	0.8	1.5	19.70	17.59	17.52	18.27	65.70	67.20	70.50	67.80	Ruptura
2A	A122	2000	0.8	3	27.75	27.68	28.46	27.96	69.20	77.20	87.20	77.87	P.Lascas
	A123	2000	0.8	4.5	27.29	28.04	27.63	27.65	73.10	74.80	81.80	76.57	Lasca
	A131	2000	1.6	1.5	15.40	17.63	17.74	16.92	-	-	-	-	Ruptura
3A	A132	2000	1.6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	P.Lascas
	A133	2000	1.6	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	Lasca
	A211	3000	0.3	1.5	21.76	21.97	21.94	21.89	80.60	79.30	79.50	79.80	Ruptura
4A	A212	3000	0.3	3	19.93	20.12	20.44	20.16	66.40	79.60	68.80	71.60	P.Lascas
	A213	3000	0.3	4.5	25.33	26.02	28.11	26.49	54.20	52.20	48.40	51.60	Lasca
	A221	3000	0.8	1.5	25.40	25.77	25.94	25.70	59.50	61.10	64.00	61.53	Ruptura
5A	A222	3000	0.8	3	16.67	15.79	16.01	16.16	82.50	79.60	77.10	79.73	P.Lascas
	A223	3000	0.8	4.5	22.09	22.88	22.64	22.54	64.40	61.30	61.10	62.27	Lasca
	A231	3000	1.6	1.5	23.50	23.20	23.49	23.40	80.00	75.30	80.30	78.53	Ruptura
6A	A232	3000	1.6	3	23.35	23.53	22.76	23.21	44.10	46.90	45.20	45.40	P.Lascas
	A233	3000	1.6	4.5	23.22	23.22	23.19	23.21	97.90	97.20	98.80	97.97	Lasca

Não foi possível detectar uma tendência direta entre a variação de determinado parâmetro de usinagem e o valor obtido para a rugosidade, seja para amostras tipo A ou B. Em processos de usinagem de metais, a rugosidade é grandemente influenciada pelo avanço (Coppini et al, 2001)

As rugosidades medidas foram compatíveis com classe de rugosidade N10 ou N11, segundo a NBR 8404-1984

Observou-se também que o formato do cavaco é fortemente influenciado pela profundidade de corte, apresentando formato de ruptura para a_p = 1,5 mm, e migrando para lascas quando a_p = 4,5 mm.

Tabela 4. Resultados de Rugosidade para Amostras tipo A – Sentido Transversal

Cortes da matéria-prima em direção transversal as fibras - TIPO (B)					Resultado dos ensaios em Ra. [µm]				Resultado dos ensaios em R3Z. [µm]				
N.P	ID	RPM	Avanço [mm/v]	Prof. [mm]	Teste 1 (µm) Ra	Teste 2 (µm) Ra	Teste 3 (µm) Ra	Ra (méd)	Teste 1 (µm) R3z	Teste 2 (µm) R3z	Teste 3 (µm) R3z	R3z (méd)	Tipo de Cavaco
	B111	2000	0.3	1.5	19.10	18.80	18.91	18.94	80.30	80.90	75.30	78.83	Ruptura
1B	B112	2000	0.3	3	19.06	19.00	19.01	19.02	68.40	69.60	69.90	69.30	P. lascas
	B113	2000	0.3	4.5	24.00	23.71	24.32	24.01	104.30	105.20	104.60	104.70	Lasca
	B121	2000	0.8	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	Ruptura
2B	B122	2000	0.8	3	-	-	-	-	91.60	88.30	90.80	90.23	P. lascas
	B123	2000	0.8	4.5	-	-	-	-	81.60	81.10	80.60	81.10	Lasca
	B131	2000	1.6	1.5	22.84	22.83	22.87	22.85	62.50	63.20	63.60	63.10	Ruptura
3B	B132	2000	1.6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	P. ascas
	B133	2000	1.6	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	Lasca
	B211	3000	0.3	1.5	18.35	17.77	17.75	17.96	70.40	70.20	72.60	71.07	Ruptura
4B	B212	3000	0.3	3	20.41	20.50	20.58	20.50	74.40	72.30	74.70	73.80	P. lascas
	B213	3000	0.3	4.5	21.52	22.50	22.04	22.02	68.90	67.80	68.60	68.43	Lasca
5B	B221	3000	0.8	1.5	28.27	28.97	28.86	28.70	69.60	69.20	74.00	70.93	Ruptura

	A311	4000	0.3	1.5	17.05	16.82	16.43	16.77	40.80	40.60	41.10	40.83	Ruptura
7A	A312	4000	0.3	3	22.92	22.70	23.08	22.90	103.00	105.20	105.60	104.6	P.Lascas
	A313	4000	0.3	4.5	16.33	15.25	15.24	15.61	60.90	60.10	60.30	60.43	Lasca
	A321	4000	0.8	1.5	18.83	19.61	18.92	19.12	75.00	75.80	75.30	75.37	Ruptura
8A	A322	4000	0.8	3	17.50	17.42	17.45	17.46	84.90	84.40	75.00	81.43	P.Lascas
	A323	4000	0.8	4.5	22.20	22.18	22.13	22.17	85.90	87.60	88.10	87.20	Lasca
	A331	4000	1.6	1.5	24.70	24.68	24.90	24.76	86.20	78.50	78.70	81.13	Ruptura
9A	A332	4000	1.6	3	20.31	20.69	20.28	20.43	70.80	72.30	72.60	71.90	Peq. Lascas
	A333	4000	1.6	4.5	18.56	18.29	18.38	18.41	83.00	84.60	83.50	83.70	Lasca

	B222	3000	0.8	3	17.27	18.44	17.23	17.65	81.10	80.60	79.60	3	P. lascas
	B223	3000	0.8	4.5	26.95	27.46	27.32	27.24	56.40	56.60	56.00	56.33	Lasca
	B231	3000	1.6	1.5	12.49	12.06	11.84	12.13	106.50	100.40	88.30	98.40	Ruptura
6B	B232	3000	1.6	3	20.38	20.13	20.70	20.40	71.80	73.40	77.20	74.13	P. lascas
	B233	3000	1.6	4.5	18.72	18.57	18.43	18.57	68.40	63.30	63.60	65.10	Lasca
	B311	4000	0.3	1.5	21.38	21.79	20.99	21.39	74.50	70.40	69.10	71.33	Ruptura
7B	B312	4000	0.3	3	17.54	17.82	17.76	17.71	60.30	59.10	64.90	61.43	P. lascas
	B313	4000	0.3	4.5	17.08	17.22	17.18	17.16	60.30	58.80	57.70	58.93	Lasca
	B321	4000	0.8	1.5	17.63	17.42	17.45	17.50	61.10	68.30	60.30	63.23	Ruptura
8B	B322	4000	0.8	3	18.50	19.15	19.37	19.01	45.00	44.70	42.90	44.20	P. lascas
	B323	4000	0.8	4.5	14.86	14.57	14.83	14.75	42.20	39.70	40.20	40.70	Lasca
	B331	4000	1.6	1.5	21.76	21.94	21.76	21.82	73.20	77.40	74.80	75.13	Ruptura
9B	B332	4000	1.6	3	15.94	17.05	17.41	16.80	84.00	75.80	75.80	78.53	P. lascas
	B333	4000	1.6	4.5	20.69	19.19	20.19	20.02	75.60	76.00	75.00	75.53	Lasca

Propriedades Mecânicas do Material

No total foram usinadas 12 peças, sendo 6 tipo A e 6 tipo B, que foram submetidas ao ensaio de tração.
Os resultados principais dos ensaios de tração para corpos de prova tipo A e tipo B podem ser acompanhados nas Tab. 5 e 6 bem como as curvas tensão x deformação geradas (Fig. 8 e 9).

Os valores da tensão última a tração variaram de 8,98 MPa até 10,04 MPa para as amostras tipo A; e de 6,48 MPa à 10,41 MPa. Estes valores estão coerentes com aqueles encontrados na referência (CMT Materials, 2009) onde a tensão última a tração é estabelecida em 1300 psi (8,96 MPa).

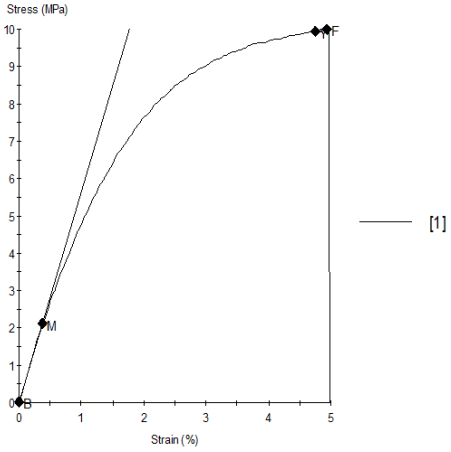


Figura 7. Curva tensão x deformação de amostra tipo A

Tabela 5. Resultado do Ensaio de Tração para uma Amostra tipo A – Sentido Longitudinal

Nome	Valor	Unidades
Espessura do Corpo de prova	3.94	mm
Largura do Corpo de prova	3.80	mm
Área	14.97	mm^2
Modulo de Elasticidade	564.91	MPa
Tensão de Escoamento	5.267	MPa
Carga Máxima	149.543	N
Tensão Máxima	9.99	MPa
Deformação Final	4.98	%

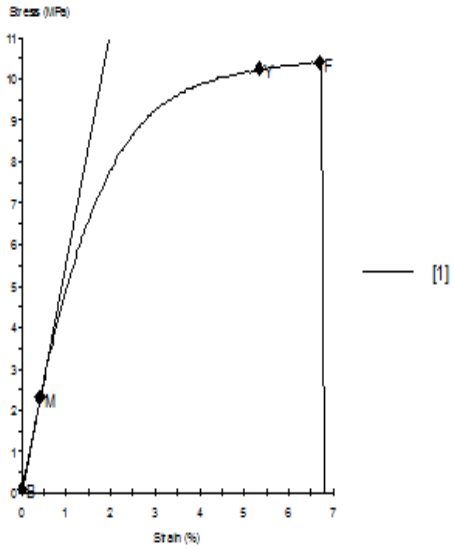


Figura 8. Curva tensão x deformação de amostra tipo B

Tabela 6. Resultado do Ensaio de Tração para uma Amostra tipo B – Sentido Transversal

Nome	Valor	Unidades
Espessura do Corpo de prova	4.00	mm
Largura do Corpo de prova	3.80	mm
Área	15.20	mm^2
Modulo de Elasticidade	557.89	MPa
Tensão de Escoamento	5.804	MPa
Carga Máxima	158.215	N
Tensão Máxima	10.41	MPa
Deformação Final	6.78	%

4.CONCLUSÕES

Este trabalho investigou as características de usinabilidade e resistência de um material compósito de poliuretano (*Renshape* 440 ®), utilizado comumente na construção de protótipos e padrões. As características de usinagem do material foram quantificadas em termos da rugosidade e do formato do cavaco gerado.

Os resultados obtidos indicam que, nas faixas de variação estabelecidas para os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), a rugosidade não se mostrou afetada prioritariamente por nenhum deles, o que contraria as observações realizadas em usinagem dos metais, onde a rugosidade é grandemente afetada pelo avanço (Coppini et al, 2001). A rugosidade também se mostrou compatível para padrões de usinagem em desbaste e se mostraram adequadas para o objeto do uso da placa, ou seja, fabricação de maquetes, modelos ou padrões visuais. Neste caso, obtiveram-se classes de rugosidade variando entre N10 e N11.

Os resultados também comprovam que o mecanismo principal de formação de cavaco é frágil (pó), porém observou-se uma tendência para geração de cavacos em lascas, em profundidades de corte crescentes.

Adicionalmente também se verificou a coerência dos valores da tensão última a tração obtida com aqueles apresentados nas referências (CMT Materials, 2009).

Futuros ensaios focarão em estudar a usinabilidade do material para operações de fresamento.

5.AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Escola de Engenharia Mackenzie.

6.REFERÊNCIAS

Lanz, W. L., Shreyes, N. M., Mahesh A. K., 2002, "Machinability of Rapid Tooling Composite Board", Journal of Materials Processing Technology, v. 127, pp. 242-245

King, D., Tansey, T., 2002, "Alternative Materials for Rapid Tooling", Journal of

Materials Processing Technology, v. 121, pp. 313-317

Novaski, O., 1994, “Introdução a Engenharia de Fabricação”, 1. ed, Edgard Blucher

Coppini, N. L., Diniz, A., Marcondes, F. , 2001, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, 2. ed. , Artliber

Freeman Manufacturing & Supply Co, 2010, “Renshape ® Modeling an Styling Boards”, Ohio, USA

CMT Materials .Inc, 2009, “Renshape Product Comparision Chart”, MA, USA

Yang, M.Y., Ryu, S.G., 2001. Development of a composite suitable for rapid prototype machining. Journal of Materials Processing Technology. 113, 280-284.

Tomori, T., Melkote, S., Kotnis, M., 2004. Injection mold performance of machined ceramic filled epoxy tooling boards. Journal of Materials Processing Technology. 145, 126-133.

Cheah, C.M., Chua, C.K., Ong, H.S., 2002. Rapid molding using epoxy tooling resin. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 20, 368-374.

Polli, M. ; Volpato, N.; Amorim, Joel Rodrigues de; Franzini, N. P. C. Influência dos Parâmetros de Corte Sobre os Erros Dimensionais no Fresamento de Material Polimérico para Moldes-Protótipo. In: 4º COBEF. Estância de São Pedro: ABCM, 2007.

MATERIALES COMPUESTOS DE SUPERFICIE SÓLIDA ELABORADOS A PARTIR DE UN JARABE DE POLIMETIL METACRILATO, TRIHIDRÓXIDO DE ALUMINIO (ATH) Y CARGAS MINERALES NATURALES (CMN)

SOLID SURFACE COMPOSITE MATERIALS OBTAIN FROM SYRUP OF POLYMETHYL METHACRYLATE, ALUMINA TRIHYDRATE (ATH) AND NATURAL MINERAL FILLERS (NMF)

Mg. Adan Arribasplata Seguin[*], Mg. Kelly Lucas Lizano[*], Dr. Juan Rueda Sánchez[*], Dr. Ing. Julio Acosta Sullcahuamán[*]

[*] **Pontificia Universidad Católica del Perú,** Facultad de Ciencias e Ingeniería, Sección Ing. Mecánica, Grupo de Investigación: Ingeniería de Polímeros y Materiales Compuestos. Av. Universitaria 1801, Urb. Pando, San Miguel, Lima, Perú, (511) 626-2000, Anexo 4844
E-mail: adan.arribasplata@pucp.pe, {klucasl, jrueda, jacosta}@pucp.edu.pe

Resumen: El objetivo es desarrollar un material compuesto de matriz acrílica, trihidróxido de aluminio y cargas minerales naturales de propiedades similares al Krion®. Se han elaborado materiales compuestos en 2 etapas: En la etapa 1, se realizó la polimerización parcial vía radicales libres de metilmetacrilato para obtener un jarabe de polimetilmetacrilato disuelto en su monómero y se determinaron los parámetros de la polimerización necesarios para evitar el efecto de autoaceleración y lograr un jarabe de un porcentaje de conversión de PMMA capaz de evitar la precipitación de partículas de ATH. En la etapa 2, se elaboraron y caracterizaron diversas muestras de materiales compuestos a partir de la mezcla del jarabe obtenido, partículas de ATH y CMN, y se determinaron los parámetros adecuados para lograr propiedades similares al Krion®. Se ha demostrado que la polimerización parcial debe realizarse durante 145 minutos a 85°C y los parámetros para obtener un jarabe con una conversión de PMMA de 25%, que evita el efecto de autoaceleración y precipitación de partículas de ATH, son: 0,1% PBO y 0,2% EGDM. Similarmente, los parámetros de elaboración de los materiales compuestos son: 0,1% PBO, 2% EGDMA y 7 h de curado en un horno a 65°C.

Palabras clave: *superficie sólida, polimerización, jarabe, curado, carga mineral natural*.

Abstract: The objective is to develop a composite material of an acrylic matrix, aluminum trihydroxide and natural mineral fillers which properties are similar to Krion®. Composite materials have been elaborated in 2 stages: In stage 1, free radical partial polymerization of methyl methacrylate was carried out to obtain syrup of polymethyl methacrylate dissolved in its monomer. Polymerization parameters were determined in order to avoid autoacceleration effect and get syrup which PMMA conversion rate avoids precipitation of ATH particles. In stage 2, several composite materials were elaborated and characterized using the obtained syrup, ATH and CMN particles and elaboration parameters were determined to get similar properties to Krion. It has been demonstrated that partial polymerization must carried out during 145 minutes at 85°C. Parameters to obtain syrup of 25% PMMA conversion rate, which avoids autoacceleration and precipitation of ATH particles, are: 0,1% PBO y 0,2% EGDM. Similarly, elaboration parameters of composite material are: 0,1% PBO, 2% EGDMA and a curing time of 7 h inside a furnace at 65°C.

Keywords: *solid surface, polymerization, syrup, curing, natural mineral filler.*

1. INTRODUCCIÓN

La polimerización en masa vía radicales libres es aplicada frecuentemente a nivel industrial para la producción de jarabes acrílicos, gracias a la cual se consigue un jarabe de polimetil metacrilato disuelto en su propio monómero cuya síntesis está limitada por el fenómeno de autoaceleracion (Elías, 2005). Dichos jarabes son utilizados como matriz polimérica para la elaboración de materiales compuestos reforzados con partículas inorgánicas que se denominan comúnmente como "*solid surface materials*". Estos materiales se caracterizan por presentar una apariencia similar a las piedras naturales, pero de baja densidad y vienen siendo utilizados como materiales de construcción para fachadas y diseño de interiores por su capacidad para ser termoformados. Debido a sus buenas propiedades mecánicas y alta calidad estética, estos materiales pueden ser utilizados para fabricar piezas de geometrías complicadas las cuales no se podrían obtener a partir de grandes bloques de piedras naturales, tales como de granito o mármol. Sin embargo, las características independientes de cada producto no son comparables, dado que las superficies solidas provienen de un proceso químico y las piedras naturales son el resultado de la creación de la naturaleza. En 1963, Dupont desarrolla el primer material de superficie sólida a partir de la polimerización parcial de metil metacrilato, cuyo jarabe fue mezclado con partículas de trihidróxido de aluminio (Munn, 1964; Duggins y Chadds, 1974; Elbasuney, 2017), para mejorar la resistencia a la propagación al fuego. A partir del uso de partículas de trihidróxido de aluminio, diversas compañías han fabricados materiales compuestos de superficie sólida con formulaciones y propiedades similares.
De estos materiales el Krion®, desarrollado por Systempool empresa del grupo Porcelanosa y Zodiaq® de la empresa Dupont™, destaca por su apariencia similar a las piedras naturales y buenas propiedades físicas. La adición de cargas minerales tales como el cuarzo permite la fabricación de materiales compuestos con diversidad de colores y diseños estéticos. En este sentido, el objetivo principal de esta investigación es desarrollar un material compuesto de propiedades similares al material comercial de referencia (Krion®) y mejorar su aspecto estético con cargas minerales naturales.

2. CONDICIONES EXPERIMENTALES

2.1. Equipos y materiales

El monómero metil metacrilato (MMA, estabilizado) para la síntesis fue adquirido de MERCK, así como los reactivos peróxido de benzoilo (PBO), etilenglicol dimercapto acetato (EGDM) y etilenglicol dimetacrilato (EGDMA). El iniciador PBO se seca a 35 °C para remover el 25% de humedad; los otros reactivos se utilizan directamente sin ninguna purificación. Para la caracterización del jarabe se utiliza solventes tales como cloroformo HPLC y n-heptano 99.5% HPLC suministrados por Merck y J.T. Baker respectivamente.
Para la elaboración de los materiales compuestos se utiliza trihidróxido de alumino (ATH) de 99,6% de pureza proveído por Huber Corporation, con un tamaño de partícula promedio de 30 micras (Onyx Elite 255). Las cargas minerales naturales (CMN) empleadas son: Mica (150um-1,59mm), cuarzo (63-105um) y marmolina (75um-1,59mm).
Los experimentos de polimerización se realizaron en un reactor cerrado marca Parr, modelo 5100 de 1500 ml de capacidad. Los materiales compuestos se elaboraron en un molde de Alumold de cavidad rectangular (280x75x12,7mm) con tapa. Además se utiliza una presa hidráulica manual de 20 ton y un horno eléctrico capaz de alcanzar 350°C.

2.2. Metodología experimental

La elaboración de los materiales compuestos se llevó a cabo en 2 etapas: 1) Polimerización parcial vía radicales libre del monómero MMA en el reactor para obtener un jarabe de polimetil-metacrilato (PMMA) disuelto en MMA y 2) Elaboración de materiales compuestos a partir de la mezcla del jarabe (PMMA/MMA) con partículas de ATH y cargas minerales naturales (CNM).

En la etapa 1, se estudian los parámetros del proceso de polimerización parcial del MMA, tales como: cantidad de iniciador (PBO), temperatura de reacción, tiempo de polimerización parcial y cantidad de agente de transferencia de cadena (EGDM), con el propósito de obtener un jarabe con porcentaje de conversión y viscosidad adecuados para evitar la precipitación de las partículas de ATH y el efecto de autoaceleración (efecto

Trommsdorff) en el reactor (ver formulaciones en la Tabla 1).

Tabla 1: Etapa 1 – Formulaciones para polimerización parcial del MMA (Jarabe)

Estudio	%PBO[1]	%EGDM[1]	Temperatura (°C)
Temperatura de reacción	0,1	0	{70; 80; 85}
Contenido de agente de transferencia de cadena	0,1	{0,1; 0,2; 0,3}	85

En la etapa 2 se pretende conseguir un material compuesto con propiedades mecánicas similares al producto comercial de referencia, denominado Krion®. Para ello se estudia el efecto de los siguientes parámetros sobre las propiedades mecánicas del material obtenido: entrecruzador (EGDMA) y cantidad de ATH. La mezcla, del jarabe y las partículas de ATH, obtenida según cada formulación, es vaciada en el molde y colocada dentro del horno a 65°C durante 7 horas para lograr el curado de la mezcla (ver formulaciones en la Tabla 2). Adicionalmente, se incorporan las cargas minerales naturales (CMN), tales como: cuarzo, mica y marmolina al 2,5% en peso en la mezcla del jarabe/ATH/CNM para el estudio de la adición de CMN en los materiales compuestos elaborados.

Tabla 2: Etapa 2 – Formulaciones para la elaboración de materiales compuestos (Jarabe/ATH/CMN)

Estudio	Jarabe/ ATH	%CMN[2]	%PBO[3]	%EGDMA[3]
Contenido de entrecruzador	40/60	0	0,1	{1; 1,5; 2}
Contenido de ATH	{40/60; 50/50; 60/40}	0	0,1	2,0
Adición de CMN	40/57,5	2,5	0,1	2,0

[1] Porcentaje en peso, respecto a la masa de MMA. En 350 ml de monómero MMA.
[2] Tipos de CMN: Cuarzo, Mica y Marmolina.
[3] Porcentaje en peso, respecto a la masa del jarabe utilizado.

2.3. Procedimiento experimental

2.3.1. Etapa 1: Polimerización parcial del jarabe (PMMA/MMA) y caracterización

En el vaso del reactor se disuelven PBO y EGDM en MMA según la formulación a evaluar (ver Tabla 1). Luego, dicha solución es calentada bajo agitación constante (350 rpm) durante un tiempo determinado. Para caracterizar el jarabe, se determina el porcentaje conversión del MMA (%PMMA) con ayuda de muestras tomadas del jarabe y disueltas en cloroformo. La solución obtenida es adicionada gota a gota en n-heptano para precipitar el PMMA y, posteriormente, este precipitado se seca en horno a 40 °C. El %PMMA se calcula con la Ecuación (1).

$$\%\text{Peso molecular} = \frac{\text{Peso de PMMA}}{\text{Peso de muestra de jarabe}} \times 100 \quad (1)$$

Además, se determina la viscosidad inherente (n_{inh}) para calcular la masa molecular (M) del PMMA. Se disuelve PMMA seco en cloroformo destilado y se determina la viscosidad inherente utilizando un viscosímetro Ubbelohde. Los ensayos se realizan a 20°C y se registra el tiempo que demora en pasar el fluido a través de las marcas establecidas en el viscosímetro. Para calcular la viscosidad inherente se utiliza la Ecuación (2), mientras que el peso molecular del PMMA (g/mol) se determina con la Ecuación 3 (Mark-Houwink). Donde t y t_o son los tiempos de flujo de la muestra y del solvente puro respectivamente a 20°C; C (g/dl) es la concentración del PMMA seco y disuelto en el solvente a 20 °C. Las constantes de Ecuación (3) para el PMMA disuelto en cloroformo a 20°C son: K= 0,00485 ml/g y a = 0,8 (Billmeyer, 1984; Wagner, 1987).

$$n_{inh} = \frac{\ln(t/t_o)}{c} \quad (2)$$

$$M = \left(\frac{n_{inh}}{K}\right)^{1/a} \quad (3)$$

2.3.2. Etapa 2: Elaboración del material compuesto y caracterización

Se mezclan el jarabe (PMMA/MMA) obtenido en la etapa 1, iniciador (PBO), entrecruzador (EGDMA) y partículas de ATH y/o las cargas minerales naturales (CMN) según la formulación a evaluar (ver Tabla 2). Se vierten 464 g de la mezcla en el molde y se aplica una fuerza de 20 toneladas sobre la mezcla con ayuda de la tapa del molde para remover las posibles burbujas de aire que quedan atrapadas en la mezcla y obtener un buen acabado superficial. Las placas del material compuesto resultantes son caracterizadas mecánicamente mediante ensayos de flexión (ASTM D790), dureza (ASTM D785) y resistencia al desgaste (ASTM G65).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Etapa 1: Jarabe (PMMA/MMA)

3.1.1. Estudio de la temperatura de reacción

La Fig. 1 muestra como varía el tiempo de reacción y el porcentaje de conversión de PMMA en función de la temperatura de reacción cuando se utiliza 0,1% de PBO. Los resultados obtenidos mostraron el efecto de la temperatura de reacción, relacionado con el tiempo de vida media del PBO ($t_{1/2}$), sobre la generación de radicales libres durante la descomposición térmica del PBO y su relación directa con la conversión del monómero. El tiempo de vida media del PBO a 70 °C es alrededor de 10 horas (Slocum, 1971), de modo que la polimerización del MMA utilizando PBO a 70°C, necesitaría alrededor de 10 horas de reacción para descomponer a la mitad el contenido de iniciador y generar radicales libres. Es por ello que los experimentos de polimerización realizados a una temperatura 70 °C requieren de mayor tiempo de reacción para lograr el mismo porcentaje de conversión (%PMMA) en comparación con la polimerización a 85 °C. Así, para polimerizar el MMA con 0,1% de PBO, se logra alrededor del 20% de conversión a 85 °C con un tiempo de reacción de aproximadamente 300 min (5 horas).

3.1.2. Estudio del contenido de agente de transferencia de cadena.

La Fig. 1 y Fig. 2 muestran como varía la viscosidad inherente del PMMA y el porcentaje de conversión de PMMA, respectivamente, en función del contenido de EGDM cuando se utiliza 0,1% de PBO a una temperatura y tiempo de reacción de 85°C y 105 minutos respectivamente. Se observa que el uso de 0,3% de agente de transferencia de cadena generó un jarabe de muy baja viscosidad, debido a que se redujo considerablemente el peso molecular de PMMA, manteniendo la conversión del monómero.

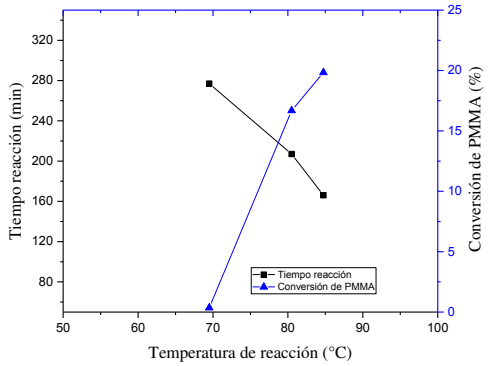


Fig. 1. Efecto de la temperatura de polimerización en la conversión (%PMMA), con 0,1% PBO.

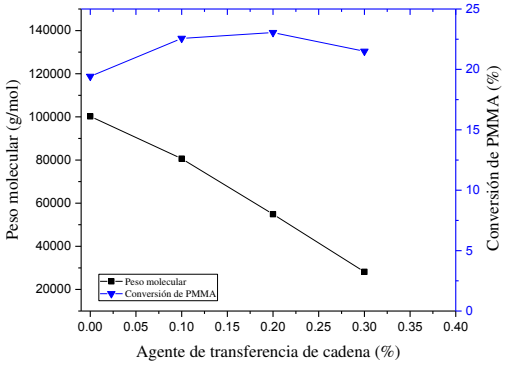


Fig. 2. Efecto del EGDM en la conversión (%PMMA), con 0,1% PBO, a 85 °C y 105 min.

En coherencia con Dupont (Duggins *et al*, 1973), se ha determinado que un jarabe con un porcentaje de conversión entre 20 a 25% de PMMA tiene una viscosidad adecuada que evita el fenómeno de auto

aceleración en el reactor y la precipitación de partículas de ATH en los materiales compuestos elaborados. Dicho jarabe se obtiene con 0,1% de PBO, 0,2% de EGDM a una temperatura y tiempo de reacción de 85 °C y 105 minutos respectivamente.

3.2. Etapa 2: Material compuesto

3.2.1. Estudio del contenido del agente entrecruzador (%EGDMA) en materiales compuestos con PMMA/ATH.

En la Fig. 3, se observa como varían la resistencia máxima, el módulo elástico, la dureza y pérdida de masa en función del contenido de EGDMA de los materiales elaborados mezclando el jarabe obtenido en la etapa 1 y 60% de partículas ATH. Se observa que, tanto la resistencia como el módulo elástico y la dureza crecen conforme aumenta con el contenido de EGDMA lo cual era de esperarse pues el EGDMA forma enlaces primarios con las macromoléculas; a mayor contenido de EGDMA, mayor cantidad de enlaces primarios entre macromoléculas y mejores propiedades. En el caso de la pérdida de masa, se observa que esta disminuye con el aumento contenido de EGDMA, lo cual es coherente, considerando que el material con menor pérdida de masa, es el material más duro. Los resultados muestran que el material con 2% de EGDMA presenta las mejores propiedades.

3.2.2. Estudio del contenido de trihidróxido de aluminio (% ATH) en materiales compuestos con PMMA/ATH.

En la Fig. 4, se observa como varían la resistencia máxima, el módulo elástico, la dureza y resistencia al desgaste en función del contenido de partículas ATH de los materiales elaborados con el jarabe obtenido en la etapa 1 con 1% PBO y 2% de EGDMA. Se observa que, tanto la resistencia como el módulo elástico y la dureza crecen conforme aumenta con el contenido de ATH. Se observa que el material con 60% de ATH presenta las mejores propiedades.

3.2.3. Estudio del contenido de cargas minerales naturales (CMN) en materiales compuestos con PMMA/ATH/CMN.

En la Fig. 5, se observa como varían la resistencia máxima, el módulo elástico y la pérdida de masa en función del tipo de CMN en los materiales elaborados con el jarabe obtenido en la etapa 1. Se aprecia una menor resistencia al desgaste al emplear mica y una mayor resistencia empleando cuarzo. Del mismo modo, a medida que se incrementa la resistencia al desgaste, el material presenta mayor resistencia a la flexión.
Los compuestos elaborados con mica y marmolina presentaron bajas propiedades de resistencia a la flexión y una baja resistencia al desgaste, debido a la pobre integración de las CMN con el jarabe y el refuerzo de ATH. Además, la mica presenta una morfología laminar en forma de hojuelas, en la que el jarabe presenta dificultad de bañado o mojado sobre la superficie de las hojuelas lo cual evita la integración homogénea de las partículas en todo el material compuesto elaborado.

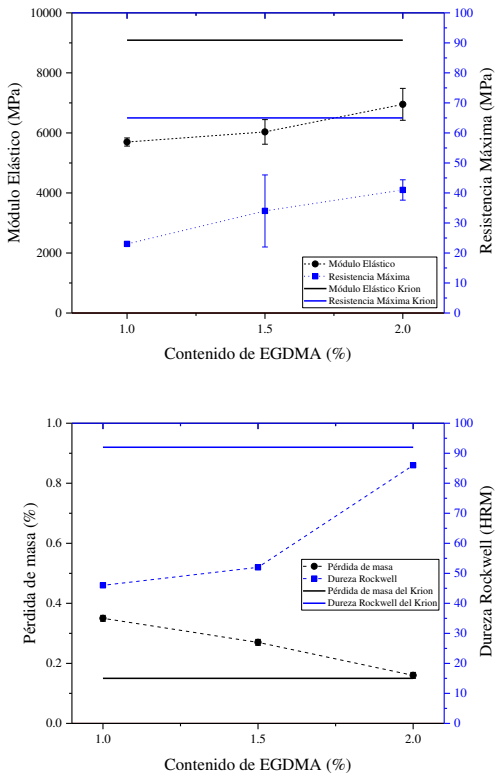


Fig. 3. Efecto del contenido de EGDMA, en los materiales compuesto elaborados respecto al Krion[4].

[4] Krion: Material comercial de referencia.

Por otro lado, el compuesto elaborado con marmolina, no logra superar las propiedades obtenidas por el compuesto con cuarzo. Sus bajos valores de propiedades mecánicas son influenciados significativamente por la distribución de tamaños de las partículas de marmolina (75µm - 1,59mm), que genera zonas heterogéneas en el material compuesto.

Los resultados obtenidos con la incorporación de cuarzo en el material compuesto, si bien no elevó las propiedades mecánicas del material a comparación del material comercial de referencia, Krion; sin embargo, proporciona hasta el momento buenos resultados sobre su calidad estética (ver Fig. 6). De esta manera, promete ser empleado en otras aplicaciones por su buena apariencia física otorgada por las partículas de cuarzo.

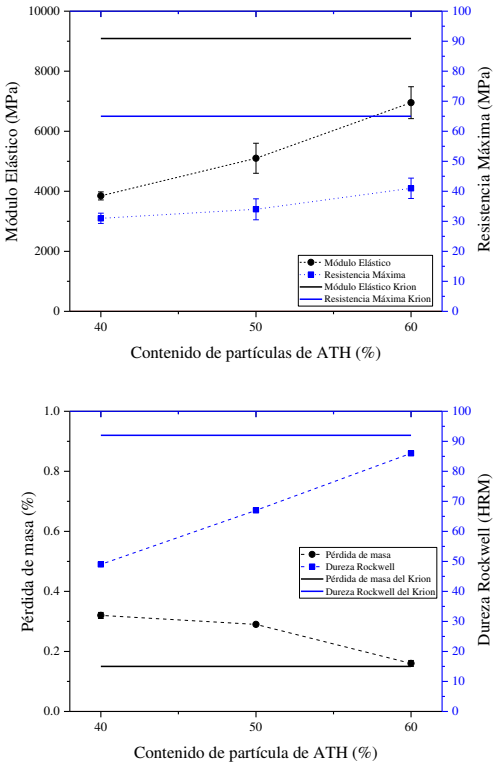


Fig. 4. Efecto del contenido de ATH en los materiales compuesto elaborados respecto al Krion[4].

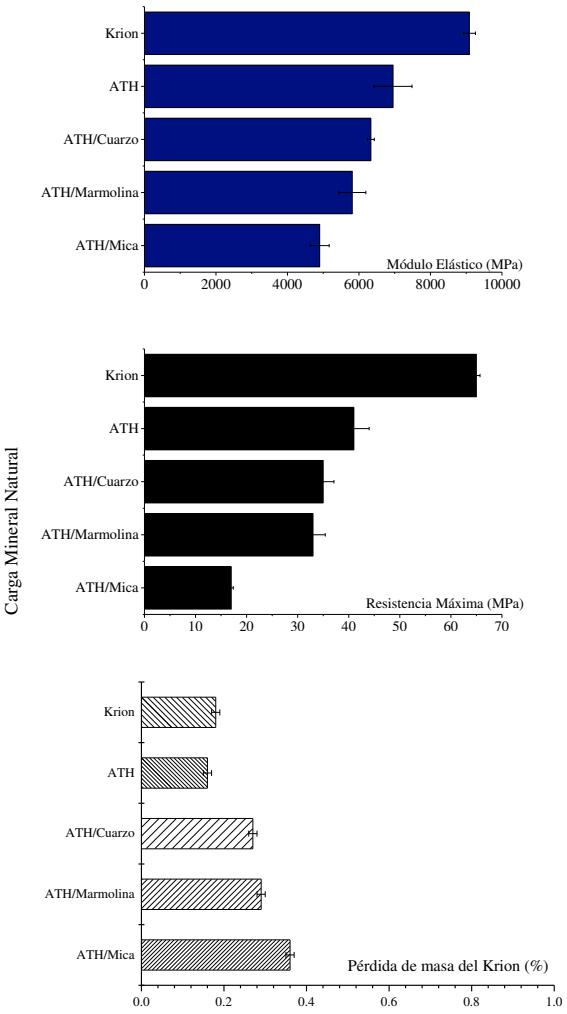


Fig. 5. Efecto del contenido de CMN[5] en los materiales compuesto elaborados respecto al Krion.

4. CONCLUSIONES

Se logra obtener un jarabe de polimetil metacrilato parcialmente polimerizado mediante una reacción en masa del metil metacrilato iniciada por radicales libres, con una conversión entre 20 – 25% en peso y con un peso molecular de alrededor 55000 g/mol. Los parámetros seleccionados para la elaboración del jarabe, para controlar la reacción, evitar la

[5] Porcentaje de CMN: 2,5%

precipitación de ATH y el fenómeno de autoaceleración, son los siguientes: 0,1% en peso de peróxido de benzoilo, 0,2% en peso de etilenglicol dimercaptoacetato, 85 °C de temperatura de polimerización y aproximadamente 105 minutos de tiempo de polimerización; los cuales se consideran parámetros experimentales adecuados para que el jarabe pueda ser utilizado como matriz de materiales compuestos.

Los parámetros para la fabricación del material compuesto de matriz acrílica con partículas de trihidróxido de aluminio son: 40% de jarabe, 60% de ATH, 0.1% de PBO, 2% de EGDMA, 60°C y 7 horas de temperatura y tiempo de curado. Este material presenta una dureza de 85 HRM, un módulo elástico en flexión de 6953 MPa, una resistencia a la flexión de 41 MPa y una pérdida de masa de 0,26 %wt a 25 revoluciones.

Se ha estudiado el efecto que tiene el tipo de cargas minerales naturales (CMN) sobre las propiedades de los materiales compuestos de matriz de PMMA reforzado con cargas de ATH. El material fabricado con 2,5% en peso de partículas de cuarzo, cuya granulometría es muy similar a la del ATH, presenta las mejores propiedades en comparación a los materiales fabricados con partículas de marmolina y mica. Todos éstos materiales presentan mejores propiedades estéticas.

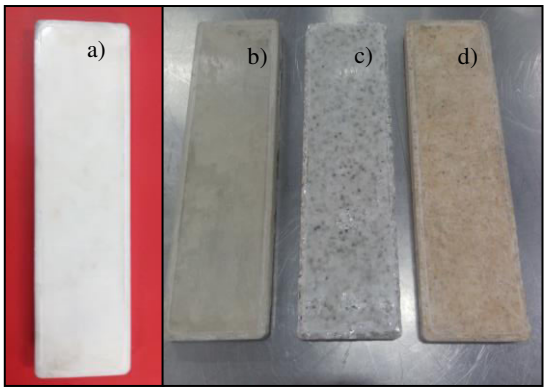


Fig. 6. Materiales compuestos obtenidos con el jarabe y partículas[6] de a) ATH, b) ATH/Cuarzo, c) ATH/Mica y d) ATH/Marmolina.

[6] Porcentaje total de partículas (ATH+CMN): 60%.

AGRADECIMIENTO

Al PROYECTO FONDECYT N°165-2015, a las BECAS FONDECYT (Convenio N° 29 – 2015) y a la Pontificia Universidad Católica del Perú por el financiamiento a la presente investigación.

REFERENCIAS

Elias, H.G. (2005), "Free-radical polymerization", in Macromolecules, D-69451 Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, pp. 359–473, Germany.

Munn, G.E. (1964), "Patent USA N°3,154,600. Methacrylate syrups and their preparation, and preparation of reinforced plastic articles employing same", USA.

Duggins, R.B. and Chadds, F. (1974), "Patent N° 3,847,865. Use of Alumina Trihydrate in a polymer Methyl Methacrylate Article", E.I. du Pont de Nemours and company.

Elbasuney, S. (2017), "Novel multi-component flame retardant system based on nanoscopic aluminium-trihydroxide (ATH)", Powder Technol., vol. 305, pp. 538–545.

Billmeyer, F. W. and Wiley J. (1984), Textbook of polymer science, Interscience publishing Inc.

Wagner, H. L. (1987), "The Mark-Houwink-Sakurada Relation for Poly (Methyl Methacrylate)", Journal of physical and chemical reference data, vol. 16, no. 2. pp. 165–173.

Slocum, D. H. (1971), "Patent N°27,093. Thick, cured polymethyl methacrylate article and process for its preparation".

Duggins, R. B., Drive, M. and Chadds F. (1973), "Patent N°3,775,364. Process for curing methyl methacrylate in the presence of peroxy catalysts".

MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON RESIDUOS CERÁMICOS Y MATRIZ DE POLIESTER INSATURADO PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

COMPOSITE MATERIALS REINFORCED WITH CERAMIC WASTE AND MATRIX OF INSATURED POLYESTER FOR APPLICATIONS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Ing.© J. Antonio Velasco Parra [*], Dr. Bladimir Ramón Valencia [**], MSc. William Javier Mora Espinosa [***]

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica – Semillero de Investigación en Materiales y Procesos de Manufactura.
Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Teléfono: (57) 315 532 5032.
E-mail: antonio.velasco@unipamplona.edu.co.

[**] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, GIMUP.
Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Teléfono: (57) 314 454 6762.
E-mail: hbladimir@unipamplona.edu.co.

[***] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, GIMUP.
Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Teléfono: (57) 311 542 9054.
E-mail: william.mora2@unipamplona.edu.co.

Resumen: La industria cerámica es uno de los principales productores de desechos sólidos en todo el mundo, emite gases de efecto invernadero y consume una gran cantidad de energía en sus procesos de fabricación. Por otro lado, no existe un control adecuado de los residuos generados, lo que conduce a un mal manejo y posterior acumulación en los vertederos. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación consiste en buscar una alternativa de reciclaje para los residuos derivados de piezas defectuosas de la industria cerámica, para aplicaciones de partes del sector automotriz. Los materiales empleados consisten en partículas de polvo de arcilla y una resina termoestable de poliéster insaturado. La fabricación del material compuesto se llevó a cabo por el método de moldeado por colado, con una concentración del 10% de partículas de arcilla. Se realizaron ensayos de flexión bajo norma ASTM, en donde se evidencia un comportamiento elástico-lineal, propio de un polímero con características frágiles. Se realizó una evaluación de la estructura a través de microscopia electrónica de barrido, las micrografías arrojaron superficies planas con incrustaciones de pequeños defectos producto de gases atrapados, durante el proceso de manufactura. Finalmente, los valores de resistencia y rigidez, fueron validados para una aplicación por el método de elementos finitos con el software ANSYS R16, en el diseño de una leva de freno de una motocicleta. Los resultados de la simulación mostraron una mejor distribución de los esfuerzos y reducción en la masa de la pieza a reemplazar, determinando un factor de seguridad de 1.13, que demuestra el cumplimiento de los requerimientos mecánicos de la

aplicación.

Palabras clave: Residuos cerámicos, compuestos reforzados con partículas, ensayo de flexión, MEF.

Abstract: Ceramic industry is one of the principal producers of solid waste throughout world, emits greenhouse gases and consumes a high amount of energy with its manufacturing processes. On the other hand, no existing an adequate control of generated waste, which leads to mishandling and subsequent accumulation in landfills. Therefore, the objective of this research is to find a recycling alternative for waste derived from defective pieces of ceramic industry, for applications in parts of the automotive sector. The materials used consist of clay dust particles and an unsaturated polyester thermoset resin. The manufacture of the composite material was carried out by the method of cast molding, with a concentration of 10% of clay particles. Flexural test under the ASTM standard were carried out, where an elastic-linear behavior, typical of a polymer with fragile characteristics, is evidenced. An evaluation of the structure through scanning electron microscopy was made, the micrographs showed flat surfaces with incrustations of small defects caused by trapping gases, during the manufacturing process. Finally, the resistance and stiffness values, were validated for an application, by the finite element method with the software ANSYS R16, in the design of a brake cam of a motorcycle. The results of the simulation showed a better stress distribution and mass reduction, of the piece to be replaced, determining a safety factor of 1.13, which demonstrates compliance with the mechanical requirements of the application.

Keywords: Ceramic waste, particle-reinforced composites, flexural test, FEM.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han llevado a cabo grandes adelantos en investigación con respecto al desarrollo de nuevos materiales compuestos, de acuerdo con las exigencias del mercado, y aplicaciones específicas en ingeniería (Kurtyka y Rylko, 2017).

La industria cerámica produce residuos sólidos resistentes a la degradación química, física y biológica, que diariamente terminan en vertederos, y por lo tanto, son procesados e implementados como refuerzos partículados en materiales compuestos (Lum W. *et al.*, 2018; El-Dieb y Kanaan, 2018; Khan *et al.*, 2016).

Para manufacturar ladrillos tradicionales de arcilla utilizados en la construcción de viviendas, se usan hornos que emiten aproximadamente 70-282 g de dióxido de carbono, 0.15-1.56 g de material partículado por kilogramo de ladrillo cocido, y requieren 0.54-3.14 MJ de energía específica por kilogramo de ladrillo producido, dependiendo del tipo de horno y combustible de trabajo (Murmu y Patel, 2018). Esto significa que las emisiones generadas incrementan paulatinamente la huella de CO_2 en el medio ambiente y el proceso de fabricación contribuye al aumento de la crisis energética del planeta (Lum W. *et al.*, 2018; Murmu y Patel, 2018; Rashid *et al.*, 2017).

En consecuencia, se han realizado numerosas investigaciones relacionadas con la reutilización de residuos industriales. Según, Lum W. et al. (2018), 145 millones de toneladas de fragmentos de productos de arcilla son utilizados en la fabricación de materiales de construcción ecológicos (El-Dieb y Kanaan, 2018; Khan *et al.*, 2016; Murmu y Patel, 2018; Rashid *et al.*, 2017).

Murmu y Patel (2018) proporcionan un enfoque prometedor acerca de los procesos y tipos de residuo que se pueden utilizar en la fabricación de materiales alternativos para la producción sostenible de ladrillos, orientados en la conservación del suelo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejora de la eficiencia energética. Seco *et al.* (2018), realizaron un trabajo empleando desechos de construcción y demolición para disminuir en un 30-50% la cantidad de arcilla utilizada en la producción de ladrillos sin cocer, mostrando la viabilidad de los residuos sólidos partículados como refuerzo de nuevos materiales.

Por otra parte, la industria automotriz es uno de los sectores más beneficiados con los avances tecnológicos en lo que respecta a los materiales compuestos, debido al aumento en la demanda social de fabricación responsable con el medio ambiente (Stoycheva *et al.*, 2018).

Con la creciente adquisición de vehículos de transporte terrestre, los nuevos requerimientos de eficiencia energética y reducción del impacto ambiental, los fabricantes utilizan materiales livianos como las aleaciones de aluminio y materiales compuestos para manufacturar componentes de menor consumo energético y mayor flexibilidad en el diseño. Adicionalmente, los compuestos con matriz polimérica son más eficientes desde el punto de vista estructural y no presentan corrosión (Banea *et al.*, 2018).

Por lo anterior, en la presente investigación se evaluaron las propiedades mecánicas a flexión de compuestos de matriz de poliéster insaturado con refuerzo de partículas cerámicas obtenido a partir de desechos procesados de ladrillo. Para tal fin, se prepararon muestras mediante el proceso de colado, obteniendo probetas normalizadas. Después de los ensayos destructivos, se analizó la fractura del material compuesto a través de la microscopía electrónica de barrido SEM. De igual forma, se realizó una simulación de una leva de freno de motocicleta, por medio del método de los elementos finitos en *ANSYS R16,* validando los valores obtenidos en el comportamiento mecánico, para un aplicativo de la industria automotriz.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y fabricación del compuesto

La matriz empleada consiste en una resina Ortoftálica insaturada preacelerada de alta viscosidad, comercializada con referencia *P-2002* por la empresa *Industria de Resinas S.A.S.* El fabricante recomienda el uso de peróxido de metíl etíl cetona (*MEK Peróxido*) al 2% p/p como catalizador. Algunas características de la resina se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de la resina P-2002

	Valor	Método
Apariencia	Rosada trasparente	IT-1.01
Viscosidad Brookfield	1500-2500 cps (25°C)	IT-1.14
Temperatura de exotermía	130-145 °C	IT-3.04
Tiempo de exotermía	14-25 minutos	IT-3.04

Fuente: Industria de Resinas S.A.S.

El refuerzo de polvo de arcilla cocida (PAC), procesado en un molino de bolas y tamizados bajo la norma de agregados gruesos *ASTM C136/C136M*, se llevó hasta un tamaño de partícula, de entre 100 y 150 micras (ver Fig.1).

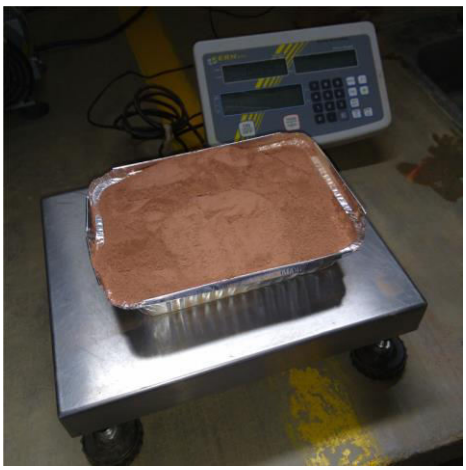


Fig. 1. Polvo de arcilla cocida.

El proceso de fabricación empleado fue por colado y vaciado en un molde, como se muestra en la Fig. 2. Inicialmente, se pesan las cantidades de refuerzo y resina, tomando como referencia un 10% en peso de polvos de ladrillo. Posteriormente, con la ayuda de un magneto y elevando la temperatura a 80°C se alcanza un estado de menor viscosidad para una

mejor distribución de las partículas en la matriz polimérica (Velásquez, 2015). El catalizador se adicionó en una dosificación del 2% en peso.

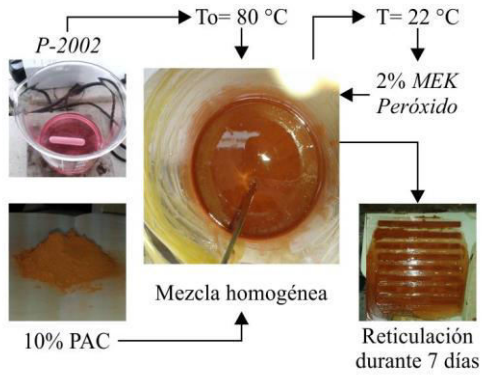


Fig. 2. Esquema del proceso de fabricación del compuesto

2.2 Caracterización mecánica a flexión

La prueba de flexión por tres puntos, se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos *SHIMATZU UH-600kN*, siguiendo la norma *ASTM D790*. Las dimensiones de las muestras fueron 150 x 10 x 6 mm, con una distancia de 75 mm entre apoyos y una velocidad de aplicación de la carga de 1.8 mm/min (ver fig. 3).

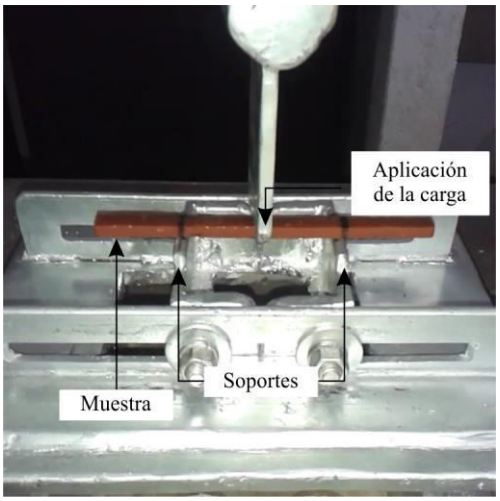


Fig. 3. Configuración para pruebas de flexión con la maquina universal de ensayos.

2.3 Microscopía electrónica de barrido SEM

El análisis SEM se realizó en el laboratorio de nanociencia y nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Bucaramanga. La muestra fue previamente metalizada con una delgada capa de oro, para lograr cierto grado de conductividad eléctrica en la misma.

2.4 Simulación de las levas de freno

El diseño CAD de la pieza se dibujó en el software *Solidworks* con base en las dimensiones reales de una leva de freno de motocicleta *Pulsar 135 LS*, mostrada en la Fig. 4a. Se proponen dos modificaciones de forma, para cumplir con los requerimientos mecánicos y facilitar el proceso de fabricación de prototipos a futuro (ver Fig. 4c y 4d).



Fig. 4. (a) Leva de freno de motocicleta Pulsar 135 LS. (b) CAD original. (c) CAD modificado 1. (d) CAD modificado 2.

Las condiciones de trabajo de las levas de freno se parametrizan analizando el funcionamiento real. En donde, Marina *et al.* (2011) estipularon que el tiempo necesario para alcanzar la fuerza máxima de agarre es de 2 segundos, mientras que con 3 segundos, se obtienen valores óptimos de contracción voluntaria máxima. En un estudio antropométrico realizado por Lee y Sechachalam (2016) se determinó que el valor de la fuerza de agarre máxima ejercida por la mano dominante es de 32.6 kg.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente descritos, se ejecutan cuatro escenarios de simulaciones, para determinar el comportamiento estructural estático de levas de freno con ayuda del software *ANSYS R16*:

- Simulación 1: Geometría original asignando las propiedades de una aleación de aluminio.
- Simulación 2: Geometría original asignando las propiedades del compuesto.
- Simulación 3: Geometría modificada 1 asignando las propiedades del compuesto.
- Simulación 4: Geometría modificada 2 asignando las propiedades del compuesto.

Para la malla, se usan elementos tetraédricos con tamaño promedio de 1 mm y ángulo normal de curvatura de 15°. Se implementa la función de forma avanzada *proximidad y curvatura* con centro de relevancia fino y suavizado alto en los elementos. Los datos de la Tabla 2 muestran la cantidad de nodos y elemento utilizados, y la similitud entre las propiedades más importantes de la malla.

Tabla 2: Datos de la malla de las geometrías

	Nodos	Elementos	Calidad de elemento	Relación de aspecto
Original	1125708	822137	0.85 ± 0.09	1.77 ± 0.41
Modificada 1	1830492	1343828	0.85 ± 0.08	1.76 ± 0.40
Modificada 2	752014	536969	0.84 ± 0.09	1.80 ± 0.42

Se configuran todos los modelos para trabajar bajo las condiciones que se observan en la Fig. 5:

A: Gravedad terrestre estándar (9.8066 m/s^2).
B: Fuerza de agarre máxima (32.6 kg) aplicada en el área de presión.
C: Restricción de desplazamiento con rotación libre en el pivote.
D: Soporte sin fricción.
E: Soporte elástico (5 N/mm^3).

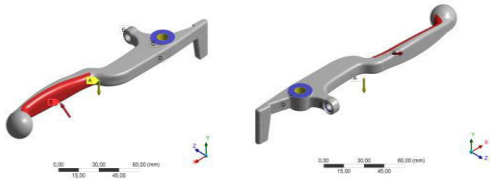


Fig. 5. Condiciones de funcionamiento de los modelos.

El tiempo de simulación es de 10 s, lapso en el cual se aplica la fuerza de agarre máxima solamente durante 3 s, como se muestra en la Fig. 6. Las demás condiciones son constantes respecto al tiempo.

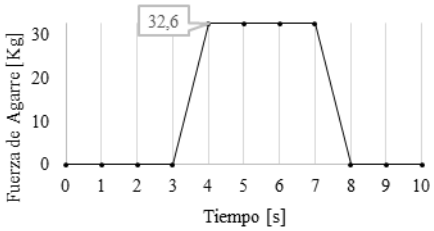


Fig. 6. Fuerza de agarre durante el lapso de tiempo.

Se calculó la deformación, el esfuerzo máximo equivalente según la teoría de Von Mises y el factor de seguridad en cada uno de los cuatro escenarios propuestos, con el propósito de determinar la influencia de la forma y el material en el comportamiento mecánico de las levas estudiadas.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Propiedades a flexión

La densidad del compuesto es 1234 kg/m^3, aproximadamente un 44.5% menor que la densidad de la aleación de aluminio.

La Fig. 7 resume los resultados del ensayo de flexión. Se observa un comportamiento elástico-lineal con un esfuerzo máximo de 48.324 MPa y un porcentaje de deformación a la falla de 7.523%. La rigidez del material en este tipo de ensayo es descrita por el módulo de flexión, obteniendo como resultado un valor de 1.169 Gpa. Importante resaltar que la naturaleza de la matriz termoestable de poliéster es de carácter frágil, y por tanto, el compuesto no sufre ningún cambio de comportamiento, en lo que corresponde a la deformación elástica.

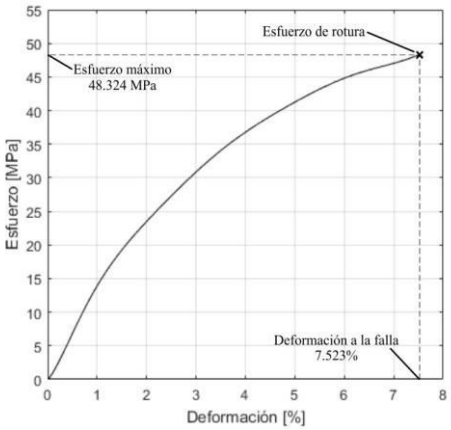


Fig. 7. Diagrama de esfuerzo contra deformación.

En la Fig. 8 se muestra la falla del material, en donde se observa la formación de una pequeña prolongación en la parte superior de la probeta, lo que permite evidenciar, que el compuesto opone resistencia al inicio y posterior propagación de la grieta, en las zonas donde la sección interior del material, se encuentra sometido a esfuerzos de compresión.

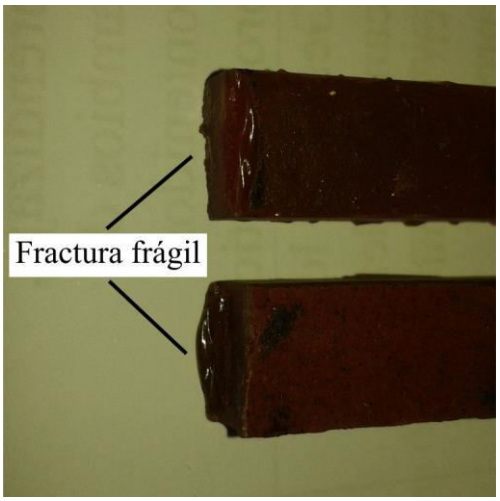


Fig. 8. Falla de la probeta.

3.2 Análisis de la morfología del compuesto

En la microscopía electrónica de barrido se analizaron las superficies de fractura a diferentes aumentos (x30, x50 y x100). El la Fig. 9a se aprecian microporos, como consecuencia de los gases atrapados durante el proceso de fabricación del material compuesto. Las imperfecciones proporcionan información acerca del mecanismo de falla, lo cual conduce a determinar, que la causa de la fractura se originó en los defectos porosos que actuaron como concentradores de esfuerzos y por tanto, ocasionaron una rotura de tipo frágil, tal y como se evidencio en los resultados del comportamiento mecánico. Los defectos resaltados en la micrografía de la Fig. 9b, tienen radios de promedio 72.93 ± 15.54 micras; adicionalmente se puede observar una inclusión con diámetro D1=472.55 micras.

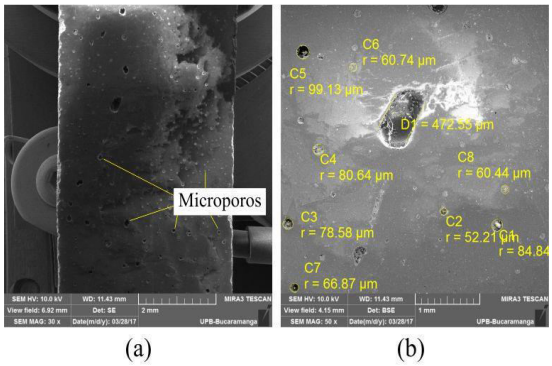


Fig. 9. Micrografías con (a) aumento 30 x, escala 2 mm. (b) aumento 50 x, escala 1 mm.

En la morfología se evidencia una distribución óptima de las micropartículas de polvo de arcilla cocida en la matriz de resina, como se muestra en la Fig. 10. Resultados similares se obtuvieron en el proceso de fabricación, presentado por Velásquez (2015), arrojando distribuciones de polvos muy semejantes a las del siguiente trabajo, evitando así, la presencia de aglomerados. No obstante, se recomienda realizar el proceso en medio al vacío con el fin de disminuir la presencia de los microporos y mejorar la resistencia a la rotura del compuesto

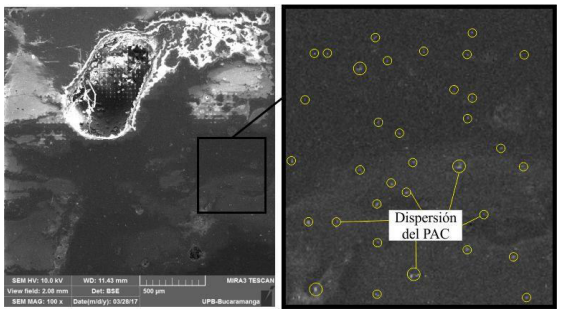


Fig. 10. Micrografía con aumento 100 x, escala 5 micras, y vista de detalle.

3.3 Validación por el método de los elementos finitos

3.3.1 Deformación máxima

Los resultados de la deformación máxima en cada simulación se presentan en las figuras de la 11 hasta la 14. La leva original en aleación de aluminio presenta una deformación máxima de 32.4 mm y en el compuesto de 86.7mm (aproximadamente 2.7 veces la deformación de la simulación 1). La deformación máxima en las simulaciones 3 y 4 es cerca del doble de la deformación que sufre la leva de freno en la simulación 1, es decir, la geometría asignando las propiedades de una aleación de aluminio. Por lo tanto, los dos escenarios con geometría, asignando las propiedades del compuesto, evidencian una mayor rigidez debido al aumento de la cantidad del volumen en las piezas, comparadas con la leva de freno original.

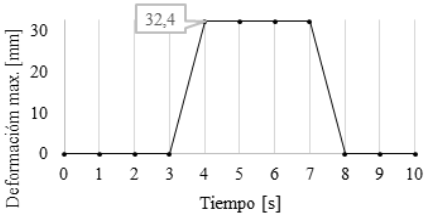


Fig. 11. Deformación máxima – Simulación 1.

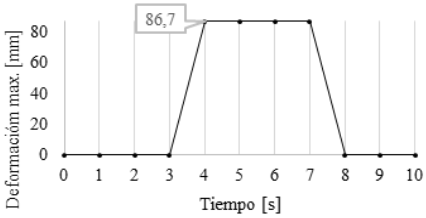


Fig. 12. Deformación máxima – Simulación 2.

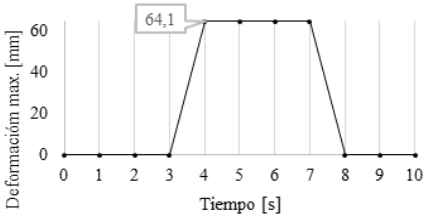


Fig. 13. Deformación máxima – Simulación 3.

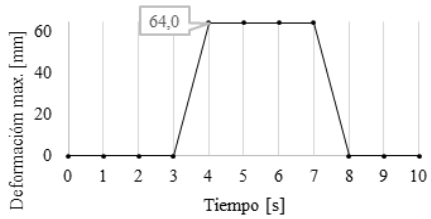


Fig. 14. Deformación máxima – Simulación 4.

3.3.2 Esfuerzo equivalente y factor de seguridad en las levas de freno

La distribución de esfuerzos y zonas críticas de cada pieza se muestran en las figuras de la 15 hasta la 18. Es necesario entender, que el esfuerzo equivalente y el factor de seguridad están relacionados; en las zonas de mayor esfuerzo, es donde se encuentran los valores mínimos del factor de seguridad.

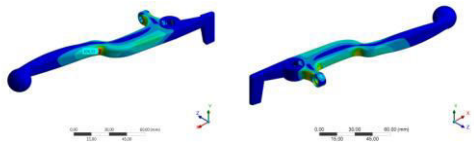


Fig. 15. Distribución de esfuerzos – Simulación 1.

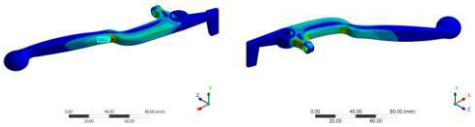


Fig. 16. Distribución de esfuerzos – Simulación 2.

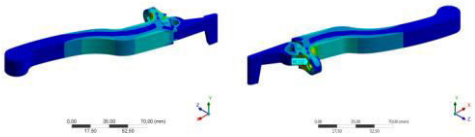


Fig. 17. Distribución de esfuerzos – Simulación 3.

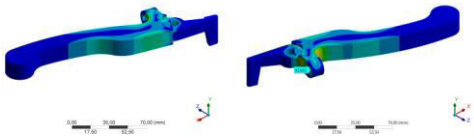


Fig. 18. Distribución de esfuerzos – Simulación 4.

En la Tabla 3, se presentan los resultados cuantitativos de las simulaciones. En las simulaciones 1 y 2 el comportamiento mecánico es similar (esfuerzo equivalente máximo de 144.3 MPa), y por consiguiente se observa que la distribución de los esfuerzos es independiente del material, y está influenciado tanto por la geometría, como la distribución de fuerzas en el elemento. Para la geometría original, el cambio de material por el compuesto demuestra una reducción en el performance de la pieza con una disminución del 87.3% en el factor de seguridad, con respecto al obtenido por la aleación de aluminio. La masa disminuye considerablemente pero es necesario rediseñar la pieza para que cumpla con las exigencias de la aplicación.

Tabla 3: Resultados de las simulaciones

	Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	Factor de seguridad mínimo	Masa [g]
1	144.3	2.68	80.28
2	144.3	0.34	35.76
3	60.1	0.81	64.64
4	42.7	1.13	76.00

En la simulación 3, el comportamiento mecánico progresa al disminuir el esfuerzo equivalente máximo a 60.1 MPa y obtener un factor de seguridad de 0.81. Esta mejora no es aleatoria, se le atribuye directamente a la simplificación y aumento de volumen que tiene la geometría modificada 1, pero aún se presentan inconvenientes en el rendimiento de la leva.

En la simulación 4, se trabaja con una geometría optimizada con base en los valores de esfuerzo y factor de seguridad derivados de la simulación 3. Se adiciona material en las zonas críticas hasta lograr una disminución en el esfuerzo equivalente, y en consecuencia, se alcanza un factor de seguridad de 1.13, lo cual refleja el cumplimiento de los requerimientos mecánicos de la aplicación. Adicionalmente, se obtiene una reducción de 4.28 g en la masa con respecto a la geometría original fabricada en una aleación de aluminio.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Por medio de esta investigación se demuestra la viabilidad de reutilizar desechos de ladrillo, procesados correctamente, para ser combinados en una matriz polimérica termoestable, dando como resultado un material compuesto con propiedades mecánicas sobresalientes. Esto contribuye al desarrollo sostenible de la industria cerámica con la intención de reducir los índices de contaminación del medio ambiente, producida por sus residuos.

La microscopia electrónica de barrido muestra una buena dispersión de los polvos dentro de la matriz, pero al mismo tiempo refleja la necesidad de mejorar el proceso de fabricación del material, con el fin de disminuir la formación de microporos y poder obtener un mejor comportamiento mecánico.

Por medio de las simulaciones realizadas en ANSYS, se logra validar la implementación del compuesto en aplicaciones de la industria automotriz. Esto se logra modificando la geometría de la leva de freno de motocicleta para obtener una mayor rigidez por parte de la pieza y una mejor distribución de los esfuerzos.

Para la siguiente investigación, se plantea el desarrollo de materiales de la misma naturaleza sustituyendo la matriz por una bioresina, continuar con el uso de residuos cerámicos, adicionalmente explorar las posibilidades de aplicar un refuerzo de cenizas volantes de la central termoeléctrica Termotasajero e implementar el proceso de fabricación "*moldeo por transferencia de resina*".

RECONOCIMIENTO

El desarrollo de esta investigación fue posible gracias a la cooperación brindada por el Dr. Bladimir Ramón Valencia, profesor adscrito al Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona (GIMUP), quien desde la coordinación del Semillero de Investigación en Materiales y Procesos de Manufactura, ayuda con su experiencia a fomentar la cultura investigativa y potencia las capacidades científicas de los estudiantes. Mil gracias.

Se agradece a la profesora Claudia Parra por su colaboración en el proceso de fabricación del material. Además, a los docentes y jóvenes becatrabajo encargados de los laboratorios del bloque de Ingeniería Mecánica, particularmente el Laboratorio de Ensayo de Materiales y el Laboratorio de Análisis en Ingeniería Computacional, donde se ejecutaron los ensayos

destructivos y las simulaciones en *ANSYS R16*, respectivamente.

REFERENCIAS

Al Wakeel, S. et al. (2018). *Particle arrangement effects on the stress intensity in composite material*, Engineering Fracture Mechanics, ELSEVIER. En línea: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794418305125.

American Society of Testing Materials (2017). *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*, ASTM D790.

American Society of Testing Materials (2014). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*, ASTM D136/DC136M.

Banea, M. D. et al. (2018). *Multi-material adhesive joints for automotive industry*, Composites Part B: Engineering, ELSEVIER, **Vol. 151**, pág. 71-77.

El-Dieb, A. S. y Kanaan, D. M. (2018). *Ceramic waste powder an alternative cement replacement – Characterization and evaluation*, Sustainable Materials and Technologies, ELSEVIER, **Vol. 17**, ref. e00063.

Khan, M. S. et al. (2016). *Industrial ceramic waste in Pakistan, valuable material for possible applications*, Journal of Cleaner Production, ELSEVIER, **Vol. 139**, pág. 1520-1528.

Kurtyka, P. y Rylko, N. (2017). *Quantitative analysis of the particles distributions in reinforced composites*, Composite Structures, ELSEVIER, **Vol. 182**, pág. 412-419.

Lee, J. y Sechachalam, S. (2016). *The Effect of Wrist Position on Grip Endurance and Grip Strength*, The Journal of Hand Surgery, ELSEVIER, **Vol. 41**, No. 10, pág. e367-e373.

Lum W., C. et al. (2018). *Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review*, Journal of Cleaner Production, ELSEVIER, **Vol. 195**, pág. 226-239.

Marina, M. et al. (2011). *Monitoring hand flexor fatigue in a 24-h motorcycle endurance race*, Journal of Electromyography and KinesiologyELSEVIER, **Vol. 21**, No. 2, pág. 255-261.

Murmu, A. L. y Patel, A. (2018). *Towards sustainable bricks production: An overview*, Construction and Building Materials, ELSEVIER, **Vol. 165**, pág. 112-125.

Rashid, K. et al. (2017). *Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate*, Construction and Building Materials, ELSEVIER, **Vol. 154**, pág. 829-840.

Sburlati, R. et al. (2018). *Hashin's bounds for elastic properties of particle-reinforced composites with graded interphase*, International Journal of Solids and Structures, ELSEVIER, **Vol. 138**, pág. 224-235.

Seco, A. et al. (2018). *Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes*, Construction and Building Materials, ELSEVIER, **Vol. 167**, pág. 154-165.

Stoycheva, S. et al. (2018). *Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing in automotive industry*, Journal of Cleaner Production, ELSEVIER, **Vol. 187**, pág. 257-272.

Velásquez P., N. (2015). *Aportes a la evaluación del comportamiento mecánico de las estructuras de entibación minera tipo puerta alemana fabricada en resina poliéster-polvo cerámico*, Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero mecánico, Universidad de Pamplona, Colombia.

Xu, W. et al. (2018). *Elastic dependence of particle-reinforced composites on anisotropic particle geometries and reinforced/weak interphase microstructures at nano-and micro-scale*, Composite Structures, ELSEVIER, **Vol. 203**, pág. 124-131.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO DE RECUBRIMIENTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO.

Enrique Alejandro López Baltazar[1,2], Haideé Ruiz Luna[2], Alejandro López Ibarra[2], Francisco Alvarado Hernández[2], Víctor Hugo Baltazar Hernández[2]

[1] **CIATEQ,** Manufactura Avanzada.
Circuito Aguascalientes Norte # 135.Parque Industrial del Valle de Aguascalientes, San Francisco de los Romo, Aguascalientes. C.P. 20358. México
52 (449) 973 1060 ext. 2208.
E-mail: ealopezb@gmail.com
[2] **Universidad Autónoma de Zacatecas,** Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales.
Av.Ramón López Velarde 801, Col. Centro, Zacatecas, Zacatecas, México.
(492) 92 5 66 90 ext. 4261, 4265.
E-mail: ruluhaid@gmail.com, lopezi_a@yahoo.com.mx, ingenierofah@gmail.com, victor.baltazar@uaz.edu.mx

Resumen: En el presente trabajo se realizaron recubrimientos superficiales de carburo de tungsteno sobre un substrato de acero del tipo AISI 1018 mediante el proceso de rociado térmico utilizando tres diferentes tipos de flama: carburante, neutra y oxidante. Los resultados indican que los valores de porosidad son menores bajo condición de flama carburante con una microestructura compuesta de partículas semi-fundidas y sin fundir, de estructura no laminar, y con presencia de líneas de óxidos. La dureza medida en el recubrimiento de condición carburante resultó por encima de los 1000Hv debido a la presencia de partículas duras de WC y de W_2C. Así mismo, los recubrimientos realizados bajo condición de flama carburante resultaron en una resistencia al desgaste bastante aceptable de acuerdo al análisis realizado bajo diferentes condiciones de carga y tiempo de deslizamiento. Finalmente se concluye que las partículas presentes de carburo de tungsteno y la dureza relativamente de éstas influyeron en la resistencia al desgaste de estos recubrimientos a pesar de la porosidad aparente observada.

Palabras clave: Rociado térmico, tipo de flama, carburo de tungsteno, porosidad, desgaste por deslizamiento.

Abstract: In this work tungsten carbide coatings have been deposited onto AISI/SAE 1018 steels by using a thermal spray process and by setting three types of flames *viz.* reducing, neutral and oxidizing. Results indicated that percent of porosity is lower in specimens made upon reducing type of flame and the microstructure is composed of semi-molten and un-molten particles, non-lamellar structure, and with presence of oxide stringers. Hardness measurements upon reducing condition resulted above 1000Hv due to presence of hard particles of WC and W_2C. Moreover, the sliding wear resistance upon reducing condition was acceptable according to the analysis made under different testing conditions of loading and sliding time. Finally, it is concluded that tungsten carbide particles and the relatively high hardness value has strong influence on the sliding wear resistance in spite of the observed porosity.

Keywords: Thermal spray, type of flame, tungsten carbide, porosity, sliding wear.

1. INTRODUCCIÓN

En los sectores como en la industria aeroespacial, automotriz, química, de petróleos y minera, utilizan los recubrimientos por rociado térmico por flama, donde su principio se basa en depositar polvos o alambre sobre un sustrato por el impacto de partículas fundidas o semi-fundidas, seguido por un enfriamiento y solidificación, con la finalidad de prolongar la vida útil de los componentes para aumentar la resistencia a la corrosión y el desgaste (Jia-Jian Tian et al., 2016; Guan-Jun Yang *et al.*, 2013).

Los parámetros que afectan directamente el proceso de rociado térmico por flama son el tiempo, la temperatura y la masa, una combinación de las variables en cada categoría pueden garantizar un recubrimiento aceptable (Areeya R., y Soranat R., 2015). Con el fin de estabilizar el proceso de rociado térmico, las variables más importantes son: la manipulación de la pistola de rociado, el tiempo de aplicación, la temperatura y la cantidad de masa depositada, las cuales deben mantenerse constantes durante el proceso (ASM TSS, 2004). Las variables con respecto al tiempo: corresponden el diseño de la pistola (geometría del orificio, diámetro de salida), flujo gas (interviene en la temperatura, velocidad y presión), relación de gases de combustión, características del gas para generación del arco y tipo de energía (química o eléctrica) (Jiajing Pan *et al.*, 2016). Otras variables que se tienen que considerar son: diámetro, tamaño, morfología, distribución de la partícula; composición química, punto de fusión, propiedades termo-físicas y el coeficiente de expansión térmica del polvo y finalmente el acabado superficial en el sustrato (Lutz-Michael Berger, 2015).

La elección de los parámetros operativos para la aplicación de los recubrimientos aleados con 86% CW, 10% Co y 4% Cr tiene un efecto importante sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento en cuestiones de adherencia y porosidad por mencionar algunos. El uso de diferentes tipos de flama tiene un efecto en la temperatura y la velocidad de la partícula al ser proyectada, de esta manera, la microestructura resultante (dureza) depende de esos parámetros. El análisis permite establecer los límites de los parámetros utilizados en función de la eficiencia en cuanto a la resistencia al desgaste.

1.1 Problema

El desgaste por fricción es uno de los problemas más comunes que se presentan y tienden al remplazo de las piezas constantemente debido a sus altas tasas de desgaste y falta de protección a la corrosión. En este estudio de investigación se pretende estudiar el efecto de los parámetros de rociado sobre la microestructura y resistencia al desgaste por fricción, que ayuden aumentar la vida útil en componentes utilizados en la industria.

1.2 Objetivo

Evaluar el grado de porosidad, espesor, microestructura y el desgaste por deslizamiento de un recubrimiento de carburo de tungsteno depositado por rociado térmico por flama en un acero AISI 1020 mediante tres diferentes tipos de flama: carburante , neutra y oxidante.

2. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS

Se emplearon muestras tipo cilindro (pin) con un diámetro de 10 mm y 31 mm de largo con geometría en forma de domo en el extremo, en acero de bajo carbono AISI 1020. Los pines fueron sometidos a un proceso de granallado (sandblasting por su nombre en inglés) para eliminar la contaminación superficial y dejar una rugosidad superficial Ra aproximada de 5 µm.

Los polvos utilizados para realizar los recubrimientos por rociado térmico por flama, es una aleación comercial de 86% CW, 10% Co, 4% Cr con un tamaño de partícula entre 11 y 45µm. Las partículas se caracterizan por ser porosas, esta porosidad se atribuye al proceso de manufactura, aglomerado y sinterizado (L. Pawlowsky, 2008).

Para depositar el polvo en el sustrato se utilizó una pistola de rociado térmico por flama, modelo CastoDyn DS-8000. Los parámetros utilizados fueron: una boquilla del número 10 (diámetro 4.8 mm), tres tipos de flama: carburante (C), neutra (N) y oxidante (O), la distancia de rociado de 200 mm, velocidad de rociado 14.7 m/mm con una sola

pasada de rociado con respecto al sustrato, como se muestra en la Fig. 1.

Para identificar las muestras (pines) con rociado térmico por flama se designaron de acuerdo al número de la boquilla y al tipo de flama, así por ejemplo la designación 10/C, corresponde el 10 al número de la boquilla y C a la flama carburante.

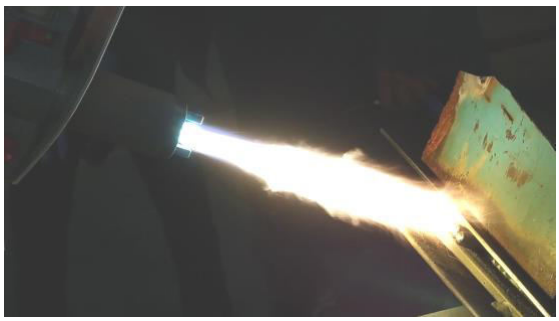


Fig. 1. Recubrimiento mediante rociado termico por flama en muestras cilindricas.

Para la prueba de desgaste por deslizamiento por el método de espiga sobre disco (pin on disk, por su nombre en inglés), se utilizó la norma ASTM G99 (G02.40, 2010), se colocaron las muestras en un sujetador buscando un contacto uniforme entre la superficie del disco de acero AISI D2 con una dureza de 62 HRC (ver Fig. 2), se variaron la carga de ensayo, y el tiempo de deslizamiento de la siguiente manera: 30N, 50N, 80N y 100N para la carga, y 10 min, 15 min, 30 min, y 45 min para el tiempo, a una velocidad rotacional de 400 rpm.

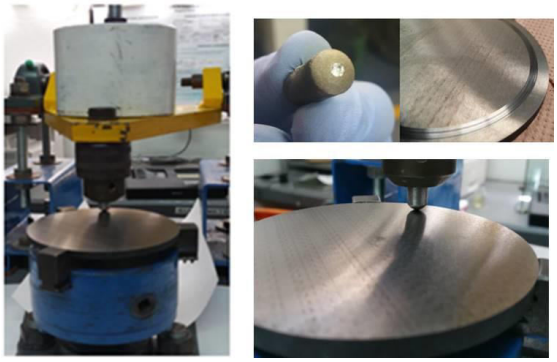


Fig. 2. Máquina de desgaste espiga sobre disco (pin on disk por su nombre en inglés).

Para el análisis metalográfico se prepararon las muestras y se establecieron planos de referencia. Para encapsular las muestras se utilizó polvo termoplástico transparente (lucita), lijas de SiC (60, 100, 500 y 1200 µm), Al_2O_3 de 0.05µm, paño Dip-Floc para 0.05 µm y un ataque para revelar la microestructura denominado Murakami´s ($K_3Fe(CN)_6$, KOH y agua destilada) (R. Boyer, 2004).

Se caracterizó la sección transversal de los recubrimientos rociados por flama usando un microscopio óptico y un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, Scanning Electronic Microscope, Tescan Mira3) equipado con un espectómetro de Rayos X de energía dispersiva (EDX, energy-dispersive X-ray spectrometer) para cuantificar la composición química.

Los recubrimientos fueron evaluados por Difracción de Rayos X (XRD por sus siglas en inglés) usando una radiación Cu-Kα en un difractómetro D8Advance Bruker.

Para la realización de las pruebas de microdureza, se utilizó un microdurómetro SHIMADZU con una carga aplicada de 2.942N y un tiempo de permanencia de 1 s.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.1 Porosidad aparente y espesor del recubrimiento.

De acuerdo a los resultados medidos de porosidad en la Tabla 1, se observa que independientemente de la flama utilizada el porcentaje de porosidad es muy consistente para los recubrimientos, siendo ligeramente mayor para la condición 10/C. Por otro lado, el espesor de los recubrimientos (ver Fig. 3), resultó en un rango entre 0.4 y 0.55 mm, siendo el recubrimiento con flama neutra el de mayor tamaño (Tabla 1).

Tabla 1: Mediciones de porosidad y espesor del recubrimiento

	% Porosidad	Espesor (µm)
10/C	16.7 ±1.6	541.8
10/N	14.7 ±1.7	549.8
10/O	15.9 ±1.9	412.7

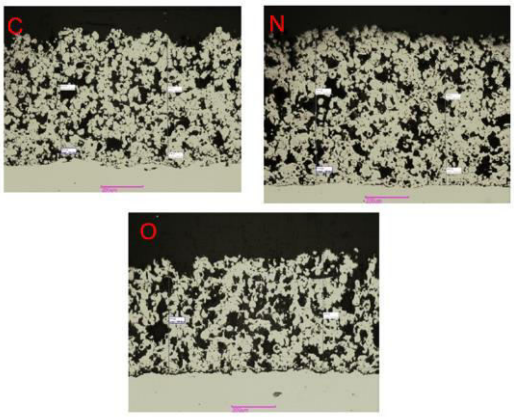


Fig. 3. Espesor y porosidad del recubrimiento en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O). *(100x)*

3.2 Microestructura y Dureza

En la Fig. 4, se observa que el recubrimiento está formado en su mayoría por partículas sin fundir y semi-fundidas, además de la presencia de porosidad (zonas obscuras). En la microestructura del recubrimiento se puede observar una zona clara la cual está compuesta al interior de carburo de tungsteno conjuntamente con la presencia del aglutinante formado de Co, Cr y W.

La microdureza medida para la condición 10/C arrojo un valor de 1039 ± 204 HV, para 10/N y 10/O microdureza de 1009 ± 203 HV y 944 ± 235 HV, respectivamente.

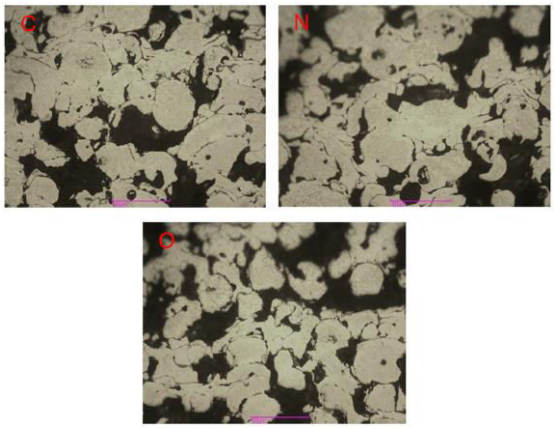


Fig. 4. Microestructura del recubrimiento en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O). (1000x)

3.3 Evaluación de fases

En el difractograma del polvo original se muestra al WC como la fase con mayor presencia, así como algunos rastros de la fase Co y la fase η-Co_3W_3C (Fig. 5). Por otro lado, las intensidades correspondientes a las fases de WC, W_2C, W y Co_3W_3C se observan en todos los recubrimientos, esto indica un proceso de decarburización y disolución del WC durante el proceso de rociado térmico (Karla Ofelia Méndez-Medrano *et al*, 2018). Sin embargo, al realizar una semicuantificación en el resultado de difracción, se obtiene que las muestras de tipo 10/C retienen en mayor proporción las fases WC, W_2C.

Los estudios de microscopia electrónica de barrido (MEB) en la muestra 10/C en sección transversal (ver Fig 6), muestra una microestructura no uniforme, con partículas no fundidas y parcialmente fundidas, óxidos y poros. Asimismo se observa los granos de carburo de tungsteno en forma redonda donde en el interior consiste en de WC rodeado de W_2C, debido a la disolución de partículas de carburo de tungsteno durante el rociado por flama (Jacobs *et al*., 1998)

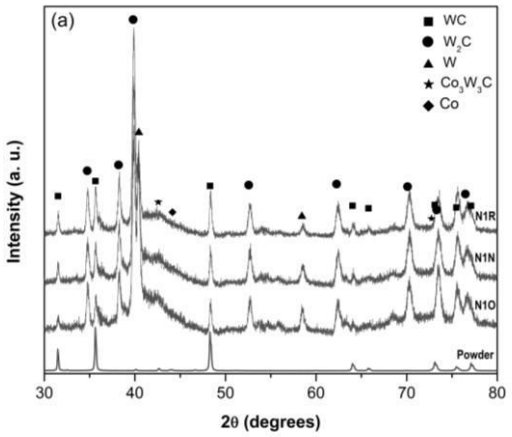


Fig. 5. Difracción de rayos X del polvo original y de recubrimientos WC-Co-Cr en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O). (Karla Ofelia Méndez-Medrano *et al*, 2018).

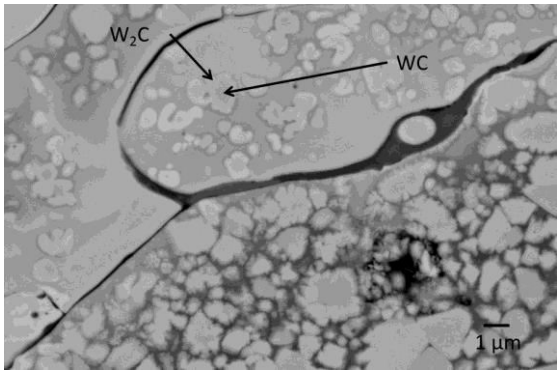


Fig. 6. WC-Co-Cr depositado con boquilla 10 y flama carburante (10/C), imagen mediante MEB (5000 x).

3.4 Resistencia al desgaste

En la Fig. 7, se observa el comportamiento de la boquilla número 10 (4.8 mm de diámetro) con diferentes flamas, se seleccionó la condición 10/C con el recubrimiento de flama carburante para la realización de más pruebas de espiga sobre disco para determinar el efecto del tiempo y carga sobre la pérdida de masa, debido a que la condición 10/C presenta menor cantidad de masa perdida con respecto a 10/N y 10/O en pruebas con una carga de 50N y tiempo de prueba de 15 min.

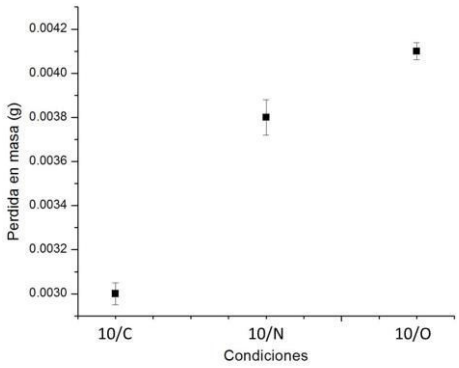


Fig. 7. Desgaste por deslizamiento de los recubrimientos WC-Co-Cr en sus tres variantes carburante(C), neutra (N) y oxidante (O) en función de la carga aplicada.

A pesar de que las muestras de condición 10/C presentaron una mayor porosidad aparente; la mejorada resistencia al desgaste por deslizamiento en esta condición puede explicarse debido a dos efectos: primero, los poros actúan como cavidades o depósitos para que las partículas generadas durante el proceso de desgaste sean atrapadas, las cuales pueden servir como lubricante o como barreras anti-desgasté (J. Voyer y B. R. Marple, 1999); segundo, la mayor proporción de las fases duras WC y W_2C presentes en estas muestras son consistentes con los altos valores de dureza obtenidos (1039 HV), lo que indica una buena relación entre microestructura-dureza-resistencia al desgaste.

3.5 Influencia de la carga aplicada y el tiempo de deslizamiento sobre el desgaste

De acuerdo a los resultados de la Figura 7; las muestras bajo condición de flama carburante (10/C) resultó con mejor resistencia al desgaste (menor pérdida en masa) en comparación con las muestras rociadas térmicamente bajo condiciones de flama neutra y oxidante.

El comportamiento al desgaste de las muestras (pines) de condición carburante 10/C sujetas a desgaste por deslizamiento en función del tiempo de exposición a una carga constante de 100N se observa en la Fig. 8. Asi mismo, se observa que

que conforme aumenta el tiempo de exposición de las muestras (por arriba de los 30 minutos) bajo deslizamiento friccionante; la resistencia al desgaste mejora (menor perdida en masa). Lo anterior se debe a que existe mayor tiempo para que las partículas duras que son desprendidas se alojen en las cavidades o poros, lo ofrece mayor cantidad de particulas alojadas a mayores tiempos de exposición, minimizando la pérdida en masa a mayores tiempos de exposición.

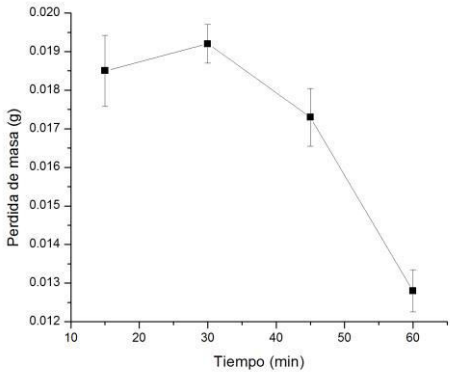


Fig. 8. Pérdida en masa con respecto al tiempo de exposición y con carga constante de 100 N para muestras 10/C.

En Fig. 9; se observa que la pérdida de masa incrementa con la carga normal aplicada. Un comportamiento que es bastante consistente para el comportamiento por deslizamiento entre pares.

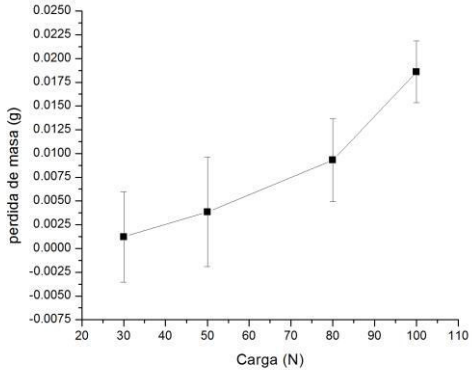


Fig. 9. Pérdida de masa con respecto a la variación de la carga de ensayo en configuración "pin on disk" y con un tiempo constante de 15 minutos, para pines de 10/C.

Posterior a las pruebas de desgaste por deslizamiento los pines se seccionaron transversalmente para el análisis de la profundidad de penetración de la huella de desgaste, tomando como referencia una muestra no ensayada por desgaste. En la Fig. 10, la línea negra representa el perfil sin desgaste, mientras que las demás líneas muestran las condiciones de desgaste con respecto al tiempo de 15, 30, 45 y 60 min.

Analizando el conjunto de gráficas que conforman la Fig. 10, podemos observar que con una carga de 100 N, la profundidad de la huella es mayor en la parte central del pin, suponiendo que por el mismo peso ejercido el deslizamiento solo es consistente en dicho punto por lo tanto se logra un desgaste puntual, en tiempos de 15 y 30 min es mayor la profundidad de la huella de desgaste al ser comparado contra su propio perfil. Estos resultados son consistentes con la mejorada resistencia al desgaste bajo condiciones de tiempos mayores de deslizamiento en el par.

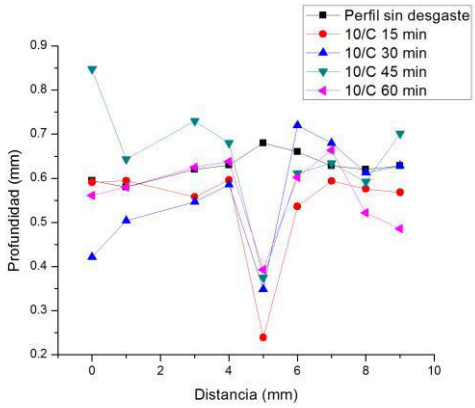


Fig. 10. Gráficas de la profundidad de huella de desgaste para pines 10/C con carga de 100N y tiempos de 15, 30, 45 y 60 min.

4. CONCLUSIONES

1. Los recubrimientos depositados bajo diferentes condiciones de flama mostraron presencia de porosidad aparente en un rango entre 147 y 16.7 porciento, sin embargo la porosidad bajo la condición de flama carburante resultó ligeramente mayor.
2. La microestructura fue consistente en todas las condiciones evaluadas y está formada de partículas semi-fundidas y/o sin fundir, compuesta de una matriz de Co, W, y con fases del tipo η-Co_3W_3C, WC, y W_2C.
3. La dureza medida en el recubrimiento de condición carburante resultó ser mayor (1039 HV) debido a un mayor porcentaje existente de partículas duras de WC y de W_2C.
4. La fracción volumétrica de partículas presentes de carburo de tungsteno (alta dureza), así como la presencia de porosidad (cavidades de alojamiento de partículas duras); influyeron paralelamente en la mejor resistencia al desgaste de los recubrimientos con condición de flama carburante.
5. La resistencia al desgaste tiende a mejorar conforme aumenta el tiempo de deslizamiento por arriba de los 30 minutos bajo una carga constante. Mientras que bajo condiciones de tiempo constante la resistencia al desgaste disminuye conforme aumenta la carga aplicada.
6. La mayor penetración del desgaste se observa en condiciones de bajos tiempos de deslizamiento en la prueba de desgaste, mientras que a mayores tiempos la penetración se ve disminuida, esto último tiene relación con la formación de cavidades que alojan las partículas duras de carburo de tungsteno.

RECONOCIMIENTO

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Zacatecas por su valioso apoyo y patrocinio en los estudios del Doctorado en Manufactura Avanzada en CIATEQ sede Aguascalientes.

REFERENCIAS

Jia-Jia Tian *et al.,* (2016). *An effective approach for creating metallurgical self-bonding in plasma-spraying of NiCr-Mo coating by designing shell-corestructured powders.* Acta Materialia, **Vol 110**.

Chang-Jiu Li *et al.,* (2013). *Development of Particle Interface Bonding in Thermal Spray Coatings: A Review.* Journal of Thermal Sparay Technology, **Vol 22.**

Areeya R., y Soranat R., (2015). *Spray coating process variable and property analysis of UV-curablepolyurethane acrylate coating on polycarbonate substrate*. Progress in Organic Coatings, **Vol 89.**

ASM Thermal Spray Society. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*. Handbook of Thermal Spray Technology (#06994G)

Jiajing Pan *et al.,* (2016). *Numerical analysis of flame and particle behavior in an HVOF termal spray process.* Materials and Design, **Vol 96.**

Lutz-Michael Berger. (2015). *Application of hardmetals as thermal spray coatings.* Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, **Vol 49.**

L. Pawlowsky. (2008). *The science and engineering of thermal spray coating*, West Sussex: Jonh Wiley and sons Ltd.

G02.40. (2010). *Developed by Subcommittee: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. ASTM International.

R. Boyer. (2004). *Metallography and Microstructures.* (2004). Metals Handbook, ASM. **Vol. 9.**

Karla Ofelia Méndez-Medrano *et al*., (2018). *Microestructure and properties characterization of WC-Co-Cr thermal spray coatings*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, **Vol 6**.

Jacobs, L. *et al.*, (1998). *Comparative Study of WC-Cermet Coatings Sprayed via the HVOF*

and the HVAF Process. Journal of Thermal Spray Technology, Vol 7, 213-218.

J. Voyer y B.R. Marple. (1999). Sliding wear behavior of high velocity oxy-fuel and high power plasma spray-processed tungsten carbide-based cermet coatings, Wear 225-229.

R. Schwetzke y H. Kreye. (1999). *Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high velocity oxygen fuel spray systems*, Journal of Thermal Spray Technology, **Vol. 8**, No. 3.

ESTUDIO DE MATERIALES PRECURSORES DEL RECICLAJE Y SUS ATRIBUTOS MECÁNICOS CON APLICACIÓN AL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LADRILLO ECOLÓGICO

STUDY OF PRECURSOR MATERIALS OF RECYCLING AND ITS MECHANICAL ATTRIBUTES WITH APPLICATION TO THE DESIGN AND MANUFACTURE OF ECOLOGICAL BRICK

Jefferson Moreno Rojas*, Dr. Bladimir A. Ramón Valencia**,
Albert Miyer Suárez Castrillón***

***Semillero MPM,** Facultad de ingeniería mecánica, Grupo de Investigación.
Universidad de Pamplona, Pamplona, Norte De Santander, Colombia.
Tel: 57 7 5685303 ext.: 154, 163, 164
**baramon12@gmail.com, ***albertmiyer@gamil.com
Universidad De Pamplona, Facultad de ingenierías y arquitectura, Programa de Ingeniería mecánica.
Km 1 Vía Bucaramanga, Pamplona, Norte De Santander, Colombia.
Teléfonos: (57+7) 5685303 - 5685304.

Resumen: Se propone la elaboración de un nuevo material para la construcción, llamado ecoladrillo, inspirado en el ladrillo tradicional de cemento. Para ello se emplea un campo marginal no empleado en la fabricación de ladrillos. Como aditivo comercial se emplea cemento, como aditivo resistente se utiliza material precursor del reciclaje (papel, cartón) triturado y ceniza de cascarilla de arroz que reemplaza en cantidades al aditivo comercial. Los resultados son satisfactorios en ensayos de compresión y responde a criterios ecológicos y sostenibles.

Palabras clave: Ecoladrillo, cemento, aditivos, sostenibles.

Abstract: It is proposed the development of a new material for construction, called ecoladrillo, inspired by the traditional brick of cement. For this, a marginal field not used in the manufacture of bricks is used. As a commercial additive, cement is used, as a resistant additive, recycled precursor material (paper, cardboard) and rice husk ash are used, which replace the commercial additive in quantities. The results are satisfactory in compression tests and respond to ecological and sustainable criteria.

Keywords: Eco-brick, cement, additives, sustainable.

1. INTRODUCCIÓN

La población mundial está creciendo a un ritmo acelerado, y con ello la contaminación ambiental; en este punto el ser humano está preocupado por darles un mejor uso a estos residuos por medio del proceso del reciclaje, el cual consiste en aplicarle un proceso al material para que así este pueda ser reutilizado y disminuir el uso de los recursos naturales [1].

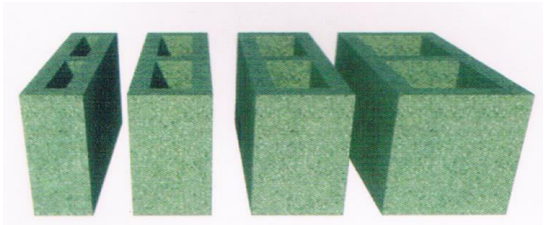
Uno de los grandes contaminantes es el uso de papel y cartón el cual es utilizado en muchos de los procesos y actividades de la vida cotidiana;

especialmente la industria alimenticia ha sido la preferida por este tipo de material para su conservación y almacenamiento. No obstante, el tiempo que tarda en descomponerse es no menor a cien años, lo cual genera un alto nivel de contaminación, que se podría reducir dándole segundo uso a estos residuos. Colombia se contamina con más de 1.500 millones de basuras al año, que llegan a ríos, playas y campos, o en el mejor de los casos, a rellenos sanitarios [2].

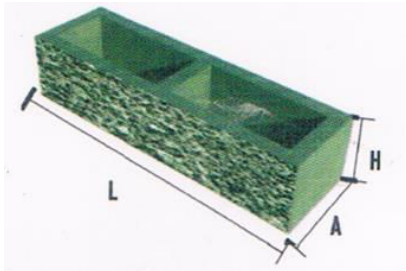
En este trabajo se muestra la utilización de las escamas de papel, cartón y cenizas de cascarilla de arroz junto con el cemento como insumos principales en la fabricación de un ladrillo comercial. Este material es una nueva alternativa para producir ladrillos de construcción que podrían competir con los ladrillos usados normalmente en el sector de la construcción. Las ventajas radican en que es un producto con un impacto ambiental menor, que genera un proceso de producción limpia, ya que se eliminaría la etapa de cocido en el mismo.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente se recolectan y clasifica el papel y el cartón en diferentes lugares de la ciudad. Luego se introduce el material a la máquina trituradora, para así tener como producto final en forma de escamas. Luego se recolecta las cenizas de cascarilla de arroz quemadas en diferentes fincas de la ciudad; se utiliza cemento comercial que podemos encontrar en cualquier ferretería, se procede a mezclar los materiales: cemento gris, agregados, una porción de agua, escamas de papel, cartón, y cenizas de cascarilla de arroz, luego se vierten en diferentes proporciones en los siguientes moldes con medidas encontradas en la tabla 1.



M1 M2 M3 M4



Referencia	A*	H*	L*
TEXTURA RUGOSA			
M1	9	19	39
M2	12	19	39
M3	14	19	39
M4	19	19	39

Medidas en cm

Tabla 1. Muestras y medidas de ecoladrillo

Luego de despegar el molde para dejarlos al sol durante un día para que se sequen. Luego de finalizado el día de secado se ponen los ladrillos en un tanque, que debe estar lleno de agua, donde pasarán 7 días aproximadamente en un proceso que se le hace al cemento, el cual se llama "curado", que brinda al ladrillo las características de cohesión. Pasados los siete días del proceso anterior, se sacan los ladrillos del agua para pasarlos a un lugar fresco, donde están bajo techo y a temperatura ambiente; son almacenados uno encima de otro y no se pueden mover durante 28 días, lapso en el que tomarán las propiedades mecánicas; este tiempo de curado es usado internacionalmente [3].

Ya terminado el proceso del ladrillo se tomaron las muestras con diferentes proporciones para llevarlas al laboratorio de pruebas de la universidad de pamplona y realizarles los ensayos de resistencia y compresión a cada una de las muestras.

Teniendo los resultados de todas las pruebas realizadas a las muestras se realizó un análisis para determinar cuál muestra tiene las mejores propiedades mecánicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la fabricación de los ecoladrillos es indispensable tomar en cuenta y calcular las densidades del cemento y de ceniza de cascarilla de

arroz, debido a que se tomó como referencia un vaso dosificador de 5 onzas en ambos materiales; por esta razón queremos disminuir la concentración de cemento para poderla remplazar por las cenizas ya que esta puede reemplazar y fortalecer las funciones que cumple el cemento en nuestro ecoladrillo.

En la tabla II se puede observar las cantidades remplazadas y ocupadas por cada material.

Muestra	Cemento % en proporción en peso	Material precursor del reciclaje %en proporción en peso	Agregados %en proporción en peso
M1	30	30	40
M2	30	30	40
M3	30	30	40
M4	30	30	40

Tabla II. Fuente autores

Las pruebas a cada una de las muestras de ladrillos se realizaron en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería mecánica de la Universidad de Pamplona. Para estas pruebas se utilizó una máquina universal de ensayos shimadzu 600 kni, la cual fortalece datos sobre la compresión que resiste el ladrillo fabricado y su límite de quiebre. Los datos son resumidos en la tabla III. El método usado consiste en aplicar una carga axial de compresión a los ecoladrillos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. Este tipo de ensayo se realizó siguiendo la norma técnica colombiana NTC 673 (Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto)

	M1 (Mpa)	M2 (Mpa)	M3 (Mpa)	M4 (Mpa)
Prueba1	5.8	6.0	6.2	6.1
Prueba2	5.9	6.1	6.1	6.2
Prueba3	6.1	6.0	5.9	6.0

Tabla III. Fuente autores

Con esta prueba podemos observar que el ecoladrillo tiene una resistencia alta y puede competir con los ladrillos de concreto convencionales de concreto y agregados.

4. CONCLUSIONES

• Se diseña y se construye un producto que cuenta con excelentes propiedades mecánicas, de fácil fabricación y que puede llegar a competir con el ladrillo que actualmente se utiliza en la construcción.
• Se da un mejor uso a los residuos que generan este tipo desechos, incluyéndolos en un nuevo proceso productivo, lo cual mitiga un poco el impacto ambiental.
• Se diseña un proceso de fabricación para tener como resultado un ecoladrillo a base de papel cartón y cascarilla de arroz, en el que se tiene en cuenta desde el proceso de recolección de la materia prima hasta el producto terminado; para dicho diseño se puso en práctica los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecánica.
• Las escamas de material precursor del reciclaje demuestra ser un material con propiedades requeridas en el área de construcción; se deben realizar los estudios necesarios para soportar dicha teoría y poder incluir el reciclaje en otras áreas de esta industria.

REFERENCIAS

[1] X. E. Castells, Reciclaje de residuos industriales. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2000, pp. 1-21.
[2] E. Uribe Botero y E. Sánchez Triana Contaminación industrial en Colombia, 2004.
[3] F. Fraternali, S. Spadea, and V. P. Berardi, “Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes”, Constr. Build. Mater., vol. 61, pp. 293-302, June 2014.

ANEXOS

-Norma técnica colombiana NTC 673- 2010/02/17
Concretos, ensayos de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.
- Norma técnica colombiana NTC 172 2000/06/21
Concretos, especificaciones de los agregados para concretos.
- Norma técnica colombiana NTC 4076 1997/04/16
Ingeniería civil y arquitectura, unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

MATERIAL COMPUESTO ALTERNATIVO PARA SISTEMAS DE ENTIBACIÓN DE MINERÍA DE CARBÓN DE NORTE DE SANTANDER

ALTERNATE COMPOSITE MATERIAL FOR MINING SHORING SYSTEMS CARBON OF NORTE DE SANTANDER

Neyl Richard Triviño[*], Rafael Bolívar León[**], Claudia Patricia Parra Medina[***]

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Ingeniería Mecánica.
Km. 1 Vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
(+57) 7 5 68 53 03.
E-mail: nrichardtj@unipamplona.edu.co*, rbolivarl@unipamplona.edu.co **,
claudypame@gmail.com ***

Resumen: Se desarrollaron materiales compuesto usando sistema de resinas epóxicas como matriz y desechos de polvo de cerámica como refuerzo para remplazar la madera usada comúnmente en los sistemas de entibación en las minas de carbón de Norte de Santander. La caracterización de los materiales se realizó mediante ensayos de flexión de y por un montaje a nivel laboratorio del sistema de entibación. Se estudiaron los tamaños óptimos de los capis mediante recolección de datos de campo, simulación y diseño de experimentos de las variables influyentes. Para determinación de las propiedades requeridas del sistema, se realizó ingeniería inversa usando la metodología de Ashby. Se determinó el impacto de la deforestación por el uso de la madera en el departamento de Norte de Santander.

Palabras clave: Entibación minera, Materiales Compuestos, Deforestación.

Abstract: Composite materials were developed using epoxy resin system as a matrix and ceramic dust waste as reinforcement to replace the wood commonly used in the shoring systems in the Norte de Santander carbon mines. The characterization of the materials was carried out by bending tests and a laboratory mounting shoring system. The optimal sizes of columns and beam were studied by collecting field data, simulating and designing experiments of the influential variables. Reverse engineering was performed to determine the required properties of the system using the Ashby methodology. The impact of deforestation due to use of wood in the department of Norte de Santander was also determined.

Keywords: Mine Shoring, Composite material, Deforestation.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia se encuentra entre las cuatro economías más grandes de Latinoamérica, este crecimiento es debido entre otros factores a la minería. Los minerales que más se explotan son el carbón, oro, plata, hierro, ferroníquel y materiales para la construcción (UNAL, 2014). En el 2017 Colombia tenía el 0,5% (4881 Millones de Toneladas) de las reservas mundiales de carbón, ocupando el segundo lugar en Latinoamérica y el decimoséptimo lugar a nivel mundial (BP, 2018). Los departamentos con mayor potencial carbonífero al interior del país son siete: Antioquia, Valle del Cauca, Cauca, Boyacá, Cundinamarca, Santander y Norte de Santander (UPME, 2010, 2012, 2016, 2017a, 2017b). Norte de Santander es una región con potencial en el sector minero-energético y el departamento ha visionado este sector como polo de desarrollo de la región (Colciencias *et al.*, 2014). En el 2015 el departamento participaba con 1,6% de las reservas de carbón del país (101,53 Mt) y se ubicaba en el tercer lugar de la minería al interior del país (Colciencias *et al.*, 2014; UPME, 2012).

La explotación de carbón le brinda al departamento el 98,56% de las regalías, por encima de la explotación de materiales para la construcción, la roca fosfórica, las calizas y las arcillas (ANM, 2017; Laguado, 2016). El proceso de explotación de carbón, involucra tres etapas: el desarrollo y montaje de las vías de acceso (obras de infraestructura y servicios de la mina); la delimitación de las áreas dentro del yacimiento (niveles y subniveles, tambores entre otros); y el arranque y producción (realizada mediante diferentes métodos y sistemas de explotación) (UPME, 2012). La explotación de carbón se realiza principalmente en la costa atlántica y en el interior del país. La minería de carbón a gran escala se realiza en la costa atlántica, mientras que en el interior predomina una minería subterránea y poco tecnificada y de baja inversión en comparación a las de cielo abierto (Cerrejón, 2018; Drummond, 2017; UPME, 2012). El soporte y la estabilidad mecánica de los socavones se realiza frecuentemente mediante sostenimiento (ANM, 2017; Colciencias *et al., 2014; UPME, 2012)*.

El sostenimiento que usan las minas de carbón de la región consiste en la colocación de un elemento estructural dentro del túnel, que brinde estabilidad al terreno que va quedando debilitado, por acción de la cavidad bajo tierra. Existen dos tipos de sostenimientos, el natural que es cuando la roca se sostiene a sí misma y el sostenimiento artificial que es creado por el hombre (las entibaciones, las fortificaciones y los sostenimientos especiales). La desventaja de estos últimos son el aumento de inversión y la necesidad de recubrimientos al trabajar en ambientes con presencia de humedad (ASOCARBON, 2004). La entibación de puesta alemana (sostenimiento con madera) es el método más usado en la región. Su conformación consiste en tres maderas rollizas que una vez ensambladas forman un trapecio con el suelo. En la parte de arriba, se ubica un capiz que sostiene el techo del socavón y se ubica de manera horizontal, actuando como viga, y dos columnas de apoyo, empotradas en el suelo conocidas como palancas, que van hasta cada extremo del cápiz. La palanca y el cápiz tienen en su extremo superior un sistema de ensamble que les permite encajar sus extremo denominado diente (ANM, 2017; ASOCARBON, 2004; Bermudez *et al*., 2013; Juárez, 2003; Mendoza *et al*., 2013; Valladares, 2007).

Por consideraciones de costo y de requerimientos mecánicos, la madera es la elección más común. Sin embargo, su duración es su punto desfavorable, ya que varía según las condiciones en la mina (curado, humedad, microorganismos, ventilación, entre otros), su vida útil puede estar entre 6 meses a 3 años. Las especies maderables más usadas para entibación son: el amarillón, el pino patula, el cañaguate, la teca, el cedro, el urapán, entre otros (ASOCARBON, 2004; MAE *et al.*, 2014; Minminas, 1987; Roncancio *et al.,* 1998). Legalmente, la madera debe provenir de bosques reforestados, sin embargo, esto no se cumple cabalmente, ya que la minería ilegal compra madera de bosques naturales no reforestados. La minería ilegal es del orden del 45% (Diario la Opinión, 2017). ASOCARBÓN (Asociación de Carboneros de Norte de Santander) también reconoce que la minería subterránea requiere grandes cantidades de madera que pueden generar impacto ambiental en la región (ASOCARBON, 2004). De la misma manera el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) reconoce que la minería ilegal se encuentra entre las cuatro principales causantes de la deforestación en Norte de Santander, junto con los cultivos ilícitos; la producción agrícola de pequeña escala (palma africana, cacao, plátano y caña); y la producción del ganado bobino (IDEAM, 2016; Opinión, 2017).

Este artículo condensa la investigación de maestría (Triviño, 2017) que pretende aportar alternativas al sector minero, desarrollando un material autóctono para sistemas de entibación de galerías principales de minería de carbón y hace un aporte de la incidencia de la minería en la deforestación y está apoyado en 5 trabajos de pregrado. Se compone de cinco partes: impacto de la minería en la deforestación; caracterización mecánica de la entibación (Bermudez, 2013); selección de materiales (Méndez y Patiño*, 2014)*; fabricación de materiales alternativos (Castrillo, 2014; Méndez y Patiño, 2014); prototipos de puerta alemana y nuevo diseño propuesto (Barrera, 2015; Velazquez, 2015).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Impacto de la minería en la deforestación

Se recolectaron datos de: a) la superficie boscosa, que se encuentran condensados en el Proyecto

"Monitoreo de la deforestación mediante el procesamiento digital de imágenes" de 2012, último registro disponible en 2016 (IDEAM, 2016); b) consumo de madera en minas de carbón proporcionada por Corponor; c) producción anual de carbón en Norte de Santander obtenidos del Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO) (Corponor, 2010; UPME, 2016, 2017a, 2017b) y d) consumo de madera de algunas minas en visitas de la región. Con estos datos, se estimó el número de hectáreas de bosque que deben ser cultivadas para suplir el consumo anual de madera usada por la minería (periodo 2006 y 2012) y se proyectó la superficie boscosa al 2020 y la cantidad de hectáreas de madera que se consumirán al año 2020.

2.2. Comportamiento mecánico de la puerta alemana

Para determinar los valores de los parámetros geométricos del sistema de entibación y los procedimientos de construcción se realizaron visitas a diferentes minas de carbón de la región (mina la Hormiga, mina la Gitana, etc.) y se recolectaron los datos correspondientes (Fig. 1), así mismo se recolecto información adicional de Corponor (Mendoza *et al*, 2013; Valladares, 2007). Con los datos recolectados en campo, se determinó la influencia de las variables en el comportamiento mecánico de la estructura por medio de un diseño de experimentos 2^5, que arrojó 32 configuraciones diferentes, con cuatro adicionales, tomando el valor del punto medio de los niveles de las variables. Estas configuraciones se simularon mecánicamente en SolidWorks 2010, usando la herramienta SolidWorks Simulation y su resultado fue el esfuerzo de Von Mises. Los resultados de la simulación se analizaron usando el software Design-Expert 8.0.7.1 (Granta Design, 2015).



Fig. 1. Toma datos de parámetros geométricos. Fuente el autor.

2.3. Selección de materiales según Asbhy

Una selección teórica de materiales se realizó usando la metodología Asbhy y el software CES EduPack versión 2014. Las funciones, restricciones y objetivos como lo pide la metodología fueron definidas a partir del análisis mecánico y además el costo, peso, tipo de procesamiento, ambiente al que son expuestos (UPME, 2012, Cabello, 2011; Granta Design, 2015).

2.4. Procesamiento y caracterización de materiales compuestos

2.4.1. *Fabricación de Probetas*

Los compuestos de resina poliéster con polvos de arcilla se prepararon por medio de la técnica de moldeo abierto ayudado con agitación magnética (1 a 7 rpm) y temperatura (19° a 70°c) para evitar burbujas dentro de la probeta (Groover, 2007). Para la fabricación de las probetas se utilizó las resinas poliéster P2000 y Cristalan 856 (Quiminet, 2015). Como refuerzo se usaron 5 muestras diferentes de polvos de arcilla o de rechazo de productos cerámicos de las industrias cerámicas de Cúcuta. En la Tabla 1, se muestran los datos de estos polvos cerámicos, se puede encontrar información sobre el nombre del polvo, tamaño de grano, porcentaje de arenas, plasticidad y la ubicación donde se puede encontrar en Norte de Santander. Las probetas se fabricaron según lo demandado por la norma ASTM D7264M-07 y las dimensiones nominales de las probetas para ensayos de flexión correspondieron a 4x13x160 mm.

Tabla 1: Materiales usados para la fabricación de probetas. Fuente el autor.

Muestra	Tipo de material	Tamaño de grano	Formación	Ubicación	% Arenas	Textura	% Plasticidad
PDO	Arcilla	212 µm (M70)	León	Pto. Stder.	14,02	Arcilloso	25,5
ESP	Arcilla	212 µm (M70)	Guayabo	Patios	38,00	Franco	21,0
Z6	Arcilla	212 µm (M70)	Guayabo	Zulia	16,02	Franco - arcilloso	23,5
TEJA	Desgrasante (chamota)	212 µm (M70)	Guayabo	Villa del rosario	NA	NA	NA
BLOQUE Nº5	Desgrasante (chamota)	212 µm (M70)	Guayabo	Zulia	NA	NA	NA

2.4.2. *Caracterización mecánica de las probetas*

La caracterización mecánica se realizó bajo el ensayo a flexión según la norma ASTM D 7264M-07 debido que el esfuerzo a flexión es al que está

sometido el punto más crítico de la estructura. Se fabrico un molde con las dimensiones según la norma donde se moldearon los materiales fabricados. Los ensayos se realizaron en la máquina universal de ensayos SHIMADZU-UH de 600 kN. Los accesorios para las pruebas fueron construidos durante la investigación según lo demandado en la norma. Los resultados se graficaron en un diagrama esfuerzo-deflexión y se determinó el esfuerzo máximo del material es el punto de flexión, el módulo de flexión.

2.5. Diseño, fabricación y caracterización de prototipos de puertas tipo alemana y tipo arco fabricadas con el material desarrollado

Con la finalidad de establecer cuál era el mejor diseño entre una estructura puerta alemana (tradicional) y una puerta tipo arco (propuesta) se realizó simulación, construcción y caracterización de dichas estructuras.

2.5.1. *Puerta tipo alemana*

Se realizó la simulación de la puerta alemana en Ansys V15 donde se cargaron las propiedades del material seleccionado a partir de la caracterización mecánica con la finalidad de establecer el ángulo de inclinación de palanca más crítico, entre seis posibilidades de montaje (74°, 76°, 78°, 80°, 82° y 84°). El mayado que se seleccionó fue tipo triangular por la mayor exactitud en conexión de puntos. Se adicionaron sujeciones de geometría fija para el modelo en planta y la carga distribuida de simulación.

Se simuló la estructura y examinó el esfuerzo máximo que soporta la puerta, mirando la deflexión. Para comparar los datos obtenidos con los obtenidos mediante ensayos a compresión que se realizan a la estructura (escala laboratorio). Se procedió a fabricar tres prototipos (escala 15:71) usando el material seleccionado para sus ensayos respectivos. El proceso de fabricación se realizó con el material CLN5-10 que mostró la mejor relación: bajo módulo de flexión, alto esfuerzo a la flexión y menor dispersión estadística. Para medir la deflexión se implementó un sistema de medición por procesamiento de imágenes. Para simular de forma correcta el túnel, se diseñó un soporte que permite que el empotramiento en la base de cada palanca y permite adecuar en el ángulo que se desee (Fig. 2). El ensayo de flexión se realizó en una maquina universal SHIMADZU UH-600 kN. La carga fue distribuida de manera uniforme en la entibación tipo puerta alemana hasta que esta falló.



Fig. 2. Montaje tipo puerta alemana. Fuente el autor

2.5.2. *Puerta tipo arco*

Para encontrar el diseño óptimo de la puerta tipo arco se realizaron simulaciones en ANSYS V15 del comportamiento mecánico de este tipo de puertas con tres secciones transversales distintas (circular, rectangular y tipo H); Los prototipos de entibación se realizaron a escala 17:81 (Fig. 3)



Fig. 3. Montaje tipo arco con sección transversal tipo redondo, cuadrada y TH. Fuente el autor

El material seleccionado, el proceso de fabricación, la caracterización mecánica y la toma de datos de la deflexión fueron las mismas que las descritas para la puerta alemana (Fig 4)



Fig. 4. Montaje tipo arco, sección redonda. Autor

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Aporte de la minería a la perdida de la cobertura boscosa de Norte de Santander

El cambio de la superficie boscosa del departamento entre los años 1990 y 2012, así como hacer una proyección al año 2020 (Fig. 5) se realizó a partir de los datos obtenidos.

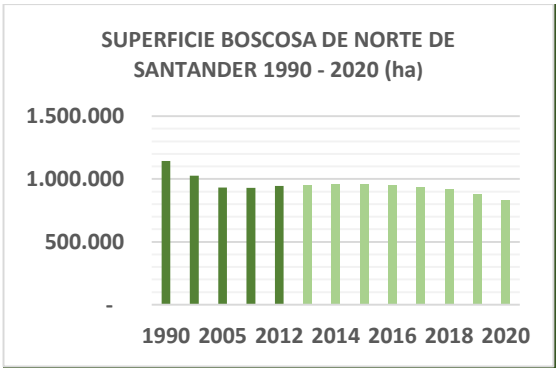


Fig. 5. Cambio de la superficie boscosa entre 1990 y 2020. Fuente: El autor tomado de (Corponor, 2010)

Como se observa en la figura, en el año 1990 se había cuantificado la superficie boscosa del departamento en 1.144.270 hectáreas y para el año 2012 se registró un área boscosa de 944.552 hectáreas. Lo que evidencia una pérdida de 199.717 hectáreas de la superficie boscosa en este periodo de tiempo. Esta pérdida representa el 17% respecto a la que había en 1990, que según la proyección al 2020, se reducirá a 832.000 ha, equivalentes a una pérdida del 27% del área de bosque estable registrado en 1990 (1.144.269 ha). La pérdida de bosque natural entre 1990 y 2012 se ha concentra en 20 de los 40 municipios que tiene el departamento. En un análisis a nivel departamental, Tibú, Toledo, Cúcuta, el Tarra, Chitaga y el Carmen registran alrededor del 50% de la perdida de la superficie boscosa de todo el departamento. Según las encuestas realizadas a diferentes unidades mineras y Corponor, se estima que, para producir 1000 t al mes de carbón, las minas usan en promedio 250 palancas (cápiz y palanca). Esto indica una tasa de consumo de 0,25 palancas/t. También se encontró que para fabricar una puerta alemana se requieren tres palancas y de un árbol se pueden extraer entre 5 a 40 palancas, dependiendo del grosor del árbol, en promedio de unas 15 palancas según Corponor. Lo que indica que para fabricar una puerta se consume 0,2 árboles. De aquí se puede inferir que se usan 0,0116 árboles por tonelada de carbón producido. Además, un cultivo con densidad optima de siembra, contiene unos 830 árboles por hectárea.

Con la información anterior y la producción anual de carbón de Norte de Santander (periodo 2006 a 2012 (UPME, 2016, 2017a), se estimó el número de hectáreas cultivadas para suplir el consumo de madera anual que requirió la minería (ver Fig. 6). Es decir, teniendo en cuenta la producción de toneladas entre 2006 (1,92 Mt) y 2012 (2,40 Mt), se estimó que se usaron unas 40 hectáreas de árboles por año (32.900 árboles/año) y en los 6 años unas 240 ha (199.200 árboles).

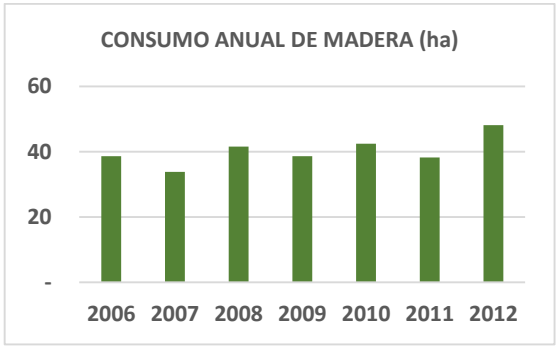


Fig. 6. Consumo anual de madera debida a la producción de carbón. Fuente: El autor basado en (UPME, 2017a)

Al contrastar las 240 hectáreas consumidas en el periodo de tiempo registrado con las 11.783 hectáreas que perdió el departamento, se encuentra que la minería sólo participó en un 2% (240 ha) a la pérdida de cobertura boscosa del departamento. El otro 98% de las hectáreas perdidas se podría deber a otras causas habituales de deforestación como la colonización no planeada, la agricultura y la ganadería extensiva (IDEAM, 2015, 2016b). Para proyectar la cantidad de hectáreas de madera que se consumirán al año 2020, también se necesita proyectar la producción de carbón al 2020. Sin embargo, la tendencia de la producción es muy incierta, ya que la gran mayoría de carbón producido es exportado con fines térmicos y metalúrgicos y las últimas tendencias a nivel internacional es sustituir este tipo de material energético a fuentes renovables (Expansion, 2017). Con la finalidad de estimar el

valor, se tomará el promedio del consumo de hectáreas de madera (40 ha/año) entre 2006 hasta 2012 y se proyectó al 2020.

Entre 2012 y 2020 se proyecta que habrá un consumo promedio de 40 ha/año. El total de hectáreas requeridas sería de 320 aproximadamente (265.600 árboles) y las hectáreas de superficie boscosa que se perderían en ese tiempo serían unas 112.500 ha. La minería sería responsable del 0,3% de la deforestación proyectada. Nuevamente, es un porcentaje muy bajo comparado con la totalidad del área perdida.

3.2. Análisis del comportamiento mecánico de la puerta alemana

Para el análisis geométrico de la estructura se identificaron 17 variables, que son 7 ángulos, 9 longitudes y 1 diámetro. En la figura 7a se muestran las variables generales de la puerta, en la 7b los ángulos y tamaños de la cuña, en la figura 7c las longitudes y en la figura 7d un isométrico de la cuña modelada.

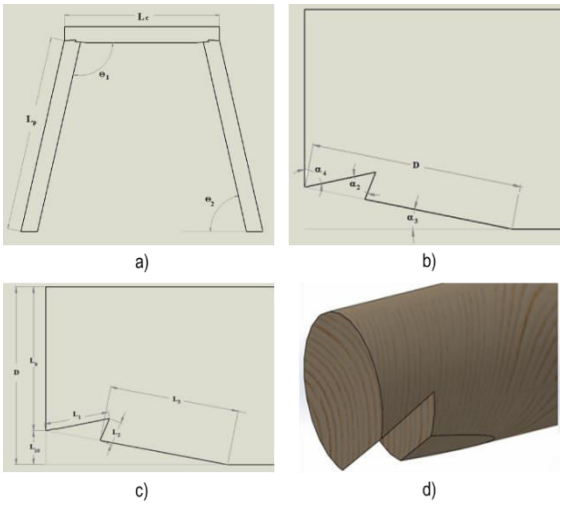


Fig. 7. Variables de la geometría de la puerta. Fuente el autor

El análisis geométrico arrojó 5 variables independientes: longitud de la cuña (L_1), inclinación de la palanca (θ_2), diámetro de la madera (D), ángulos de la cuña (α_2) y (α_4). Los niveles máximos y mínimos de las 5 variables obtenidas se pueden apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2: Rangos de las variables independientes. Fuente el autor

Variable	Mínimo	Máximo
L_1= Longitud de la cuña	5.5 cm	8 cm
θ_2 = Inclinación de la palanca	74º	84º
D= diámetro	14.6 cm	18 cm
α_2= ángulo en la cuña	66º	90º
α_4= ángulo en la cuña	67º	90º

Las 32 simulaciones mostraron que los valores de las cargas de falla máxima y mínima que se obtuvieron fueron 585,4 kg y 357,4 kg, respectivamente, y que existían tres puntos críticos en la estructura, los cuales se ubican en la parte superior del centro del capiz (punto 1), en la parte inferior del centro del capiz (punto 2) y en el punto adyacente a la cuña en la palanca (Fig. 8).

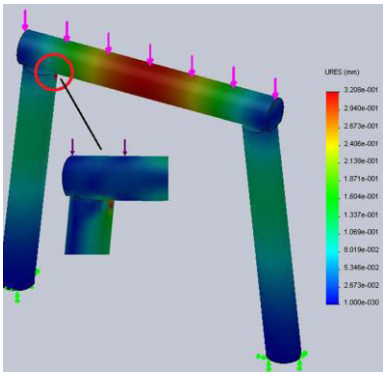


Fig. 8. Puntos críticos en la estructura. Fuente el autor

Mediante el diseño de experimentos 2^5 y el análisis estadístico respectivo (ANOVA), se encontró que dos variables: el diámetro (A) y el ángulo de inclinación de la palanca θ_2 (B), y su interacción (AB) tenían influencia estadística en el valor del esfuerzo de Von Mises. La contribución de estas variables es mostrada en la Tabla 3, donde se aprecia que el diámetro es el factor más sensible, con una contribución al esfuerzo de Von Mises de 76% para los puntos 1 y 2 de la estructura; pero para el punto 3 su contribución es casi la mitad, de 45%, potenciando la contribución del ángulo (θ_2) y de la interacción del diámetro con el ángulo (Diámetro* θ_2).

Tabla 3: Rangos de las variables independientes. Fuente el autor

Puntos	Factor	% Contribución	
		C. Máxima	C. Mínima
Punto 1	Diámetro	77,43	77,47
	Teta 2	9,12	9,06
	Interacción	7,87	7,87
Punto 2	Diámetro	74,92	74,94
	Teta 2	11,43	11,35
	Interacción	8,84	8,91
Punto 3	Diámetro	45,02	45,09
	Teta 2	30,55	30,51
	Interacción	20,10	19,93

** Interacción de los factores Diámetro por Teta 2*

Se calculó las ecuaciones del modelo estadístico obteniendo una ecuación potencial cubica para cada punto como se muestran en la figura 9. Los números dentro del contorno representan el esfuerzo de Von Mises y los ejes las dos variables influyentes (Angulo de inclinación y diámetro). La variación de color hacia el rojo indica la falla inminente del capiz.

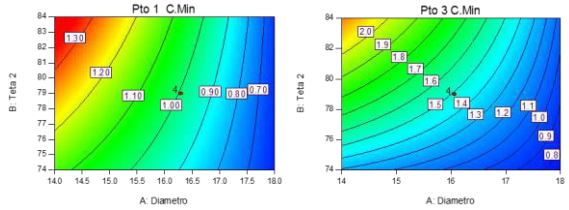


Fig. 9. Gráficos de nivel del esfuerzo de Von Mises según las variables influyentes. El autor

Esta gráfica puede ser usada en campo, para seleccionar el diámetro de la madera y usar un ángulo específico, donde la formación geológica interna de la mina permita, es decir si se tienen palancas de diámetros pequeños, se debería buscar unos ángulos más agudos para asegurar un menor esfuerzo en el punto 3. Como se ve, se podrían usar diámetros de madera pequeños, de 14 cm, aunque en la práctica solo se prefieren los mayores a 17 cm por una selección empírica. El uso de estos diámetros menores tendría una gran incidencia en el tiempo de corte de los árboles. La gráfica de la superficie respuesta (Fig. 10) del punto 1 y 2 muestra que no existen máximos o mínimos en superficie, es decir que el comportamiento representado en la figura 10 es lineal.

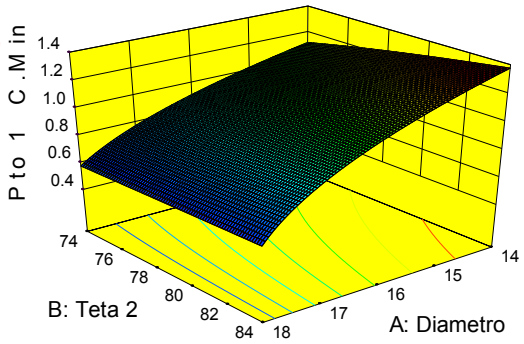


Fig.10. Superficie respuesta en función de los parámetros influyentes para punto 1 y 2. El autor

3.3. Materiales seleccionados usando Asbhy y análisis de disponibilidad

Para la selección de materiales se definió determinar las propiedades de la palanca y el capiz independientemente como se muestra en la Tabla 4. Los valores fueron obtenidos bien por un análisis de las condiciones internas de la mina (Temperatura máxima de servicio, ambiente al que está expuesto) y por el método de ingeniería inversa, tomando las propiedades mecánicas del eucaliptu que es la madera habitualmente usada en las minas de la región.

Tabla 4: Parámetros de diseño para el cápiz y la palanca. Fuente el autor.

PARÁMETROS DE DISEÑO		
	CÁPIZ	PALANCA
FUNCIÓN	Resistir cargas a flexión: 74,43 a 174,86MPa	Resistir cargas a compresión: 36,48 a 89,73MPa
RESTRICCIONES COMUNES	Densidad entre 0,530 a 1,1 g/cm3 Exposición a ambientes húmedos Temperatura máxima de servicio de 65°C Resistencia a gases hidrocarburos Resistencia a la flama Algunos agentes patógenos Resistencia ante ácidos débiles	Densidad entre 0,530 a 1,1 g/cm3 Exposición a ambientes húmedos Temperatura máxima de servicio de 65°C Resistencia a gases hidrocarburos Resistencia a la flama Algunos agentes patógenos Resistencia ante ácidos débiles
OBJETIVOS	Maximizar el desempeño Minimizar peso y densidad Minimizar costo	Maximizar el desempeño Minimizar peso y densidad Minimizar costo

Con estas propiedades, se procedió a determinar el material con el software CesEdupack como se muestra a continuación. Para las palancas se encontró que la lista de materiales ubicados en la región conformada por el esfuerzo de compresión de 36,48 MPa y temperatura máxima de servicio mayores de 65°C fue de 2473 materiales. Descartando materiales como vidrios y materiales naturales, los cuales no cumplían con los requisitos planteados. En el caso del cápiz se encontró que la lista de materiales ubicados en la región conformada por el esfuerzo de flexión de 74,43 MPa y la temperatura máxima de servicio desde 65°C, fue de 530 materiales. Eliminando los cerámicos no técnicos y espumas y reduciendo a los demás en un gran porcentaje (ver Fig. 11).

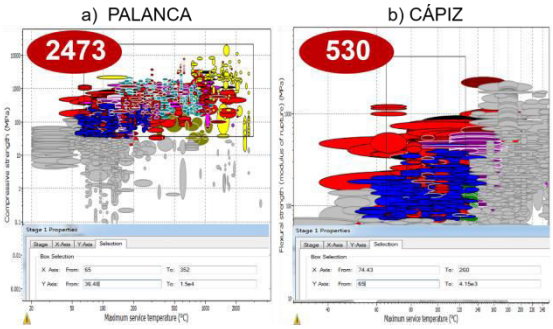


Fig. 11. Regiones que cumplen la primera restricción para las palancas y el cápiz. Fuente el autor.

Al aplicar la restricción entre la resistencia a los ácidos débiles y la resistencia a la flama condujo a una reducción en la lista de 2158 materiales para las palancas y de 337 para el cápiz. Al graficar el índice de material para las palancas, trazando una línea con pendiente igual a 1 (columna) y realizando la restricción entre precio contra densidad (seleccionando los materiales que estuvieron por debajo de la densidad de 1.1 gr/cm^3), la lista de materiales se redujo a 17 materiales. En el caso del cápiz se redujo la lista de posibles materiales a 10, eliminando en su totalidad a la familia de los metales y aleaciones, como se esperaba al restringir la selección a materiales que posean densidades menores a 1,1 gr/cm^3. De estos materiales se eliminaron algunos debido a que no eran fácilmente encontrarles en la región ni tienen posibilidad de importación fácilmente, resultando aquellos referenciados en la tabla 5.

Tabla 5: Materiales seleccionados para la palanca y cápiz. Fuente el autor

a) PALANCA

Familia de materiales	Materiales seleccionados
Polímeros (plásticos)	Poliamida aromática
	Resina epoxica
	Metacrilato de acrilonitrilo-butadieno-estireno
	Metacrilato de metilo copolímero
	Poliamida transparente
Elastómeros	Poliéter bloque amida
	Poliuretano termoplástico
Composites	Compuesto de moldeo bisfenol

b) CÁPIZ

Familia de materiales	Materiales seleccionados
Polímeros (plásticos)	Poliamida aromática
	Resina epoxica
	Metacrilato de metilo
	Poliamida transparente
Elastómeros	Poliéter bloque amida(Shore 55D)
	Poliuretano termoplástico.

En el caso de las poliamidas transparentes y aromáticas, el Poliéter bloque amida, y Poliuretano Termoplástico no se encuentran en Colombia, por lo que debería obtenerse mediante un importador nacional (Quiminet, 2015). La resina epoxi se encuentra en la región, posee excelentes características mecánicas pero su precio es muy elevado en comparación con la resina poliéster (Granta Design, 2015). Las puertas de madera tienen un valor muy pequeño, aproximadamente 10 dólares para 2017. Debido a la anterior situación se decidió desarrollar un material compuesto, usando una resina de bajo costo (Poliester) y reforzantes cerámicos provenientes de la industria cerámica de la región.

3.4. Fabricación y caracterización de materiales compuestos desarrollados

3.4.1. *Fabricación de Probetas*

Se fabricaron diez materiales compuestos con resina poliéster P2000 y dos con resina Cristalan 856. Los reforzantes fueron polvos de arcilla (cinco tipos) y molido de ladrillo y teja en configuraciones de 90% resina y 10% polvo; 80% resina y 20% polvo (Fig. 12).



Fig. 12. Probetas fabricadas. Fuente el Autor

Para cada material se fabricó 5 muestras para el ensayo de flexión, y adicionalmente se hicieron 5 blancos de resina P2000, es decir en total se fabricaron 65 probetas para el ensayo de flexión.

Tabla 6: Configuraciones de las mezclas. Fuente el autor

#	Código	% Resina	% Polvo
5	BLANCOS	100% resina poliéster P2000	---
5	PDO10	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo PDO
5	PDO20	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo PDO
5	Z610	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo Z6
5	Z620	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo Z6
5	ESP10	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo ESP
5	ESP20	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo ESP
5	LN510	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo LN5
5	LN520	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo LN5
5	TEJA10	90% de resina poliéster P2000	10% de polvo TEJA
5	TEJA20	80% de resina poliéster P2000	20% de polvo TEJA
5	CLN510	90% de resina poliéster cristalan 856	10% de polvo LN5
5	CLN540	60% de resina poliéster cristalan 856	40% de polvo LN5
60	TOTAL DE PROBETAS FABRICADAS		

3.4.2. *Caracterización a flexión*

Las propiedades de módulo de flexión, resistencia a la flexión y la deflexión obtenidos en el ensayo de flexión son mostradas en la Tabla 7. Estos valores corresponden al promedio: del módulo de flexión; esfuerzo máximo de flexión; y la deflexión de las muestras ensayadas.

Tabla 7: Propiedades físico-mecánicas de blancos, compuestos y algunas maderas. Fuente el autor

CÓDIGO	% REFUERZO EN PESO	MODULO DE FLEXIÓN (Mpa)	ESFUERZO DE FLEXIÓN (MPa)	(%) DEFLEXIÓN	DENSIDAD (g/cm^3)
BLANCOS	---	2.680	139,8	7,9	1,1
PDO10	10	1.880	87,2	4,8	1,2
PDO20	20	27.800	141,7	3,7	1,2
Z610	10	34.470	170,5	5,5	1,2
Z620	20	33.520	161,9	5,5	1,2
ESP10	10	8.370	115,7	6,3	1,2
ESP20	20	11.020	168,8	5,4	1,2
LN510	10	29.630	166,1	3,3	1,2
LN520	20	48.140	291,9	3,0	1,2
TEJA10	10	7.600	90,5	5,5	1,2
TEJA20	20	7.600	100,9	3,3	1,2
CLN510	10	5.330	120,3	3,8	1,2
CLN510	40	8.667	199,5	0,9	1,2
CEDRO	--	5.200	50,1	--	0,7
TECA	--	10.450	81,4	--	0,8
PINO	--	9.770	74,4	--	0,9
EUCALIPTO	--	13.530	104,7	--	1,0

De los datos se puede observar que el módulo de flexión del material LN520 supera 4,9 veces el promedio de las maderas (cedro, teca, eucalipto y pino) y en todos los casos superaron el promedio del esfuerzo de flexión de las maderas (77,7 Mpa). El mayor esfuerzo de flexión lo exhibe el material LN520 con 3,8 veces más en relación con el promedio de las maderas. Sin embargo, su alta rigidez de 3 veces la de las maderas, lo hace inadecuado, debido a que se requiere que el material tenga capacidad de deformarse elásticamente para que la superficie en contacto con las paredes sea mucho más alta.

Los materiales que cumplieron los criterios determinados en la metodología Ashby y además combinaron de la mejor forma un alto esfuerzo de flexión, bajo módulo de flexión y poca dispersión estadística en las pruebas, fueron el LN510 y el CLN5-10. A estos materiales se les realizó un análisis de costos para determinar el valor del material usado con base en el volumen determinado por el área requerida para soportar los esfuerzos calculados en la viga. Para ello se compararon los diámetros utilizados comúnmente en la minería subterránea (14, 16, 18 cm) con los necesarios que deben tener los nuevos materiales para que cumplan el mismo requerimiento mecánico. En la Tabla 8 se muestra el cálculo de los radios, volúmenes y precio de los nuevos materiales respecto a los radios de la madera del eucalipto. Se decidió seleccionar el material CLN5-10 para la fabricación de prototipos de entibación, ya que el costo de fabricación con la de la resina Cristalan 856 es 15% más bajo que con la P2000 (ver Tabla 8).

Tabla 8: Correspondencia de los nuevos materiales respecto a los radios de las maderas.

Madera	Momento Máx flector (N*m)	Radios de la madera (cm)	Material LN510		
			Radio cm	Volumen cm^3	Precio ($)
EUCALIPTO	28.213	7	6,00	0,020	$275.027
	42.114	8	6,86	0,027	$359.219
	59.964	9	7,72	0,034	$454.637
Madera	**Momento Máx flector (N*m)**	**Radios de la madera (cm)**	**Material CLN5-10**		
			Radio cm	**Volumen cm^3**	**Precio ($)**
EUCALIPTO	28.213	7	6,68	0,025	$227.327
	42.114	8	7,64	0,033	$296.917
	59.964	9	8,59	0,042	$375.785

3.5. Análisis del material en puertas tipo alemana y tipo arco a escala laboratorio.

3.5.1. *Simulación a carga estática de puertas alemanas usando el material CLN510*

Se cargó a la base de datos el material CLN510 con las propiedades obtenidas en los ensayos previos (esfuerzo, modulo, densidad). Se realizaron seis simulaciones en ANSYS (74°, 76°, 78°, 80°, 82° y 84°), a cada se le aplicó una carga distribuida de 5000 N sobre el cápiz (escala 15:71). La configuración con mejor comportamiento mecánico fue la de ángulo 74° con un diámetro promedio de 42mm; tuvo una deformación de 3,58 mm y soportó un esfuerzo 55Mpa. Con esta configuración se realizaron los prototipos a escala laboratorio.

3.5.2. *Caracterización mecánica de las puertas tipo alemana usando el material CLN510*

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de los prototipos de puerta alemana fabricada con el material CLN510 a escala laboratorio. (Tabla 9).

Tabla 9: Resultados del ensayo a compresión de prototipo puerta alemana. Fuente el autor

Pruebas	Máxima carga(N)	Máximo esfuerzo (Mpa)	Máxima deflexión (mm)	Máxima deflexión (%)
1	3988	2,88	4,67	1,22
2	9368	6,76	8,85	2,33
3	7392	5,33	6,74	1,77
4	8646	4,97	7,25	2,02
5	6915	5,57	6,76	1,88
Promedio	**7756**	**5,10**	**6,85**	**1,85**

Comparando los resultados obtenidos en las pruebas de ensayo a compresión con los datos de la simulación en ANSYS (55Mpa), se observó que el esfuerzo máximo soportado en la simulación es más de 10 veces mayor a lo resistido en los ensayos a compresión. Este resultado pudo producirse por defectos internos que actúan como concentradores de esfuerzos durante la fabricación y defectos de ensamble entre cápiz y palanca, como se observa en la figura 13, no tienen acople perfecto, como es habitual que suceda en el montaje real en las minas. En la tabla 10, se puede observar que el desplazamiento en la simulación es muy parecido al desplazamiento del procesamiento de imágenes.

Tabla 10: Comparación de los resultados de la simulación y los ensayos a compresión

Tipo	Carga (N)	Deflexión (mm)	Máximo esfuerzo (Mpa)
Simulación ANSYS v16	5000	3,58	55
Probeta Real A Escala	6465	3,95	5



a) b)

Fig. 13. a) Entibación Minera tipo puerta alemana. b) ruptura de la entibación. Fuente el autor.

3.5.3. *Simulación a carga estática de puertas tipo arco usando el material CLN510*

Con el material CLN510 previamente cargado en la base de datos de ANSYS, se realizaron tres simulaciones para puertas tipo con arco (escala 17:81) con tres secciones transversales distintas (circular, rectangular y tipo H); se aplicó una carga distribuida de 5000N sobre la parte curva. La configuración que tuvo mejor comportamiento mecánico fue la de sección transversal circular. Tuvo una deformación de 1,56 mm y soportó un esfuerzo 396Mpa. Con este tipo de sección transversal se realizaron los prototipos a escala laboratorio.

3.5.4. *Caracterización mecánica de las puertas tipo arco a escala laboratorio*

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de los prototipos de puerta tipo arco fabricada con el material CLN510 a escala laboratorio. (Tabla 11).

Tabla 11: Resultados del ensayo a compresión de prototipo puerta tipo arco. Fuente el autor

Probetas	Máxima carga (N)	Máximo esfuerzo (Mpa)	Máximo deflexión (mm)	Máxima deflexión (%)
1	12600	24,87	15	3,49
2	8379	16,53	7	1,71
3	16157	31,89	14	3,10
4	12369	24,41	11	2,42
5	N/A	N/A	N/A	N/A
Promedio	**12376**	**24,42**	**12**	**2,68**

Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas de ensayo a compresión con los datos de la simulación en ANSYS, se observó que el esfuerzo máximo a flexión soportado en la simulación (396Mpa) es más de 15 veces mayor a lo resistido en los ensayos a compresión (Tabla 11). Como se manifestó en la caracterización de la puerta alemana, el resultado pudo producirse por defectos

internos que actúan como concentradores de esfuerzos durante la fabricación. En la tabla 12, se observa que desplazamiento en la simulación es la mitad del logrado en el procesamiento de imágenes. El punto en el que fallaron las probetas evidenció que la entibación tipo arco a escala de laboratorio sufrió falla en el mismo lugar que indicó la simulación.

Tabla 12: Comparación de los resultados de la simulación y los ensayos a compresión. Autor

Tipo	Carga (N)	Deflexión (mm)	Máximo esfuerzo (Mpa)
Simulación ANSYS v16	5000	1,56	396,0
Probeta Real A Escala	5002	3,79	24,4

3.5.5. *Análisis comparativo entre la puerta alemana y tipo arco fabricadas usando CLN510 a escala laboratorio*

Por medio de los ensayos de compresión a las probetas de entibación tipo puerta alemana y tipo arco a escala de laboratorio, se logró validar que ambas soportan una carga aplicada de 5000N. Por otro lado, mostró que las puertas tipo arco soportan aproximadamente 5 veces más esfuerzo que las puertas tipo alemana. Si se toma como base el esfuerzo máximo soportado, se puede ver la viabilidad de este tipo de puertas para la fabricación de puertas de entibación en campo.

4. CONCLUSIONES

Se encontró que las áreas de coberturas boscosas más afectadas se ubican en Tibú, Sardinata, el Tarra, Cucutilla, Bochalema y Chinácota. Se estimó que entre 2006 y 2012 la minería de carbón del departamento sólo aportó un 2% (240 ha) a la perdida de cobertura boscosa. Proyectando los datos de consumo de madera y hectáreas de cobertura boscosa al 2020, la minería aportaría un 0,3% a la perdida boscosa total.

De todos los factores considerados en el diseño de la puerta alemana, se determinó que únicamente el diámetro y el ángulo θ_2, y su interacción tienen influencia estadística en el comportamiento mecánico de la estructura. Se encontró que es posible seleccionar las palancas de madera y construir la estructura de la puerta con diámetros tan pequeños como 14 cm en sitios donde pueda acondicionarse el ángulo θ_2, aprovechando las palancas pequeñas que muchas veces no son usadas. Con las gráficas que se obtuvieron es posible predecir el comportamiento de las puertas ya montadas y entrenar a los mineros para que el montaje de las estructuras sea más confiable.

De la selección de materiales mediante la metodología de Ashby, se determinó que 27 materiales, pertenecientes a las familias de los polímeros (termoplásticos, termoestables) y elastómeros cumplían con los parámetros de diseño. Estos materiales fueron descartados, debido a que eran de difícil consecución, lo que conduce a una elevación de los costos de fabricación. Se optó por desarrollar un material compuesto de matriz polimérica reforzado con polvos cerámicos.

De los 5 polvos de arcilla usados, el polvo de ladrillo N°5 es el mejor reforzante y de todos los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con polvos de arcilla que se analizaron, el material que mejor combina un alto esfuerzo de flexión, un bajo módulo de flexión y poca dispersión estadística en las pruebas es el CLN510 y con este material se definió fabricar los prototipos.

Las pruebas de ensayos para valorar estructuras de entibación desde el punto de vista mecánico del material compuesto CLN5-10 (resina poliéster con polvos cerámicos de ladrillo N°5), arrojaron datos que muestran que la entibación tipo arco fabricada con el material compuesto podría llegar a soportar hasta 5 veces más carga que las puertas tipo puerta alemana y pueden tener viabilidad para la fabricación de puertas de entibación en campo. Los comportamientos de falla en las puertas se dieron en la misma posición que en la simulación realizada en ANSYS.

REFERENCIAS

ANM. (2017). *Caracterización de la actividad minera de Norte de Santander*. Retrieved from https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_norte_de_santander_23-01-2017.pdf

ASOCARBON. (2004). *Sostenimiento, Transporte y Explosivos en Minas de Carbón* (No. 2). Cúcuta.

Barrera Agudelo, Nicolás, Parra Medina, Claudia,

Triviño Jaimes, N. R. (2015). *Aportes a la evaluación del comportamiento mecánico de la estructura de entibación minera tipo arco fabricada en resina poliéster - polvos cerámicos*. Universidad de Pamplona.

Bermudez Bermudez, Luis Miguel, Triviño Jaimes, Neyl Richard, Bolívar León, R. (2013). *Caracterización mecánica del sistema de entibación de algunas minas tradicionales de carbón en Norte de Santander*. Universidad de Pamplona.

BP. (2018). Statistical Review of World Energy 2018, 1–53. Retrieved from https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf

Cabello, P. (2011). *Seleccion de materiales*. Universidad Politécnica de Puerto Cabello.

Castrillo Caro, Dumys, Bolívar León, Rafel, Trivño Jaimes, N. R. (2014). *Comportamiento a flexión de un material compuesto de polyester con polvo cerámico como posible sustituto de la viga en la entibación minera*. Universidad de Pamplona.

Cerrejón. (2018). Carbones de Cerrejón. Retrieved November 1, 2017, from http://www.cerrejon.com

Colciencias, Gobernación de Norte de Santander, Universidad del Rosario, & Universidad de Pamplona. (2014). *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación - PEDCTI 2014-2024*. Cúcuta. Retrieved from http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/pedcti-norte-santander.pdf

Corponor. (2010). *Monitoreo de la Deforestación 1990-2012*. Bogotá D.C.

Diario la Opinión. (2017, August 25). El 45% de las minas en Norte de Santander son ilegales, p. 1. Retrieved from https://www.laopinion.com.co/economia/el-45-de-las-minas-en-norte-de-santander-son-ilegales-138984#OP

Drummond. (2017). Drummond LDT. Retrieved from http://www.drummondltd.com

Granta Design. (2015). Ces Edupack. Cambridge. Retrieved from http://www.grantadesign.com/ES/education/

IDEAM. (2015). *Lanzamiento cifra de deforestación anual 2015*. Bogotá D.C. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023668/infografia_tasa_deforestacion_2015.pdf

IDEAM. (2016a). *Cuadro de Áreas del Cambio de Bosque para los periodos 1990 -2016 para el departamento de Norte de Santander*. Bogotá D.C. Retrieved from http://www.ideam.gov.co/geoportal

IDEAM. (2016b). *Estrategia Integrada de control a la deforestación.* Bogotá D.C. Retrieved from http://www.ideam.gov.co/documents/24277/0/Presentación+Estrategia+Integral+de+Control+a+la+Deforestación/173f79bf-3e68-4cbc-9387-80123d09b5e2

Juárez Ferreras, R. (2003). *Sostenimiento de talleres en minas de carbón con entibación hidráulica individual*. España.

Laguado, W. V. (2016). Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2016-2019 " Un Norte Productivo Para Todos " Documento presentado para estudio y aprobación ante la Honorable Asamblea.

MAE, (Ministerio del Ambiente del Ecuador, R. D. L. N. U. P. L. A. Y. L. A., & FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, I. (2014). Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales, 1–115.

Méndez Sierra, F. A., & Patiño Morantes, Adrián Ricardo, Bolívar León, Rafael, Triviño Jaimes, N. R. (2014). *Selección y desarrollo de materiales para entibación minera de Norte de Santander usando la metodología Asbhy*. Universidad de Pamplona.

Mendoza Nancy , Rueda Daniel, O. W. (2013). Desarrollo de un sistema de entibación en minería subterranea en Norte de Santande. Pamplona.

Mikell Groover. (2007). Procesos de formado para materiales compuestos. In McGraw-Hill (Ed.), *Fundamentos de Manufactura Moderna* (Tercera Ed, pp. 319–333). México: McGraw-Hill.

Ministerio de Minas y Energia. Norma: Sobre procedimientos de sostenimiento en las excavaciones mineras (1987). Colombia. Retrieved from http://www.simco.gov.co/simco/documentos/

Seg_Minera/proced_excavaciones_mineras0001.pdf

Pekín prohibirá el carbón en 2020. (2014). Retrieved November 21, 2017, from https://cop23.unfccc.int/index.php/es/news/pekin-prohibira-el-carbon-en-2020

Quiminet. (2015). POLISUIN S.A. Retrieved November 26, 2017, from https://www.quiminet.com/shr/es/polisuin-250300422/contacto.htm

Roncancio, D., Vega, E., & Herrera, G. (1998). Guia para plantaciones Forestales Comerciales. Norte de Santander.

Triviño, N. R. (2017). *Desarrollo de un material alternativo para sistemas de entibación en galerías principales de minería de carbón*. Universidad de Pamplona, Pamplona.

UNAL. (2014). *Simulación y evaluación del impacto de estratégias en el desarrollo del sector minero 2014 - 2032*. Medellín.

UPME. (2010). *Indicadores de la minería en Colombia*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

UPME. (2012). *La Cadena del Carbón*. Colombia. Retrieved from http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=ghcA7YSxZko%3D&tabid=96

UPME. (2016). Boletín Estadístico: Minas y energía 2012 – 2016, 200. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/simco/Documents/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf

UPME. (2017a). *Producción de Carbón por Municipios*. Bogotá D.C. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes_SIMCO/Paginas/MSPC6.aspx

UPME. (2017b). Zonas carboníferas de Colombia. Retrieved from http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/areas/zonas/indice.htm#NORTE

Valladares, H. J. (2007). *Cálculo y diseño de entibaciones para excavaciones en profundidad*. Universidad Austral de Chile. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov.myaccess.library.utoronto.ca/pubmed/11720961

Velazquez, Nicanor, Parra Medina, Claudia, Triviño Jaimes, N. R. (2015). *Aportes a la evaluación del comportamiento mecánico de las estructuras de entibación minera tipo puerta alemana fabricada en resina poliéster- polvos cerámicos*. Universidad de Pamplona, Pamplona.

Www.expansion.com. (n.d.). España abandonará el carbón en 2020 para reducir en un 50% sus emisiones. Retrieved November 25, 2017, from http://www.expansion.com/empresas/energia/2017/11/15/5a0c4cce22601d05108b463d.html

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

SINTESIS DE POLVO DE TITANIO POR REDUCCIÓN METALOTÉRMICA

SYNTHESIS OF TITANIUM POWDER BY METALOTHERMIC REDUCTION

Mg. Rafael Bolivar León *, Professor Dr.-Ing Dr. h.c. Bernd Friedrich **

* **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Mecánica. Sede el Buque, Pamplona, Colombia.+57 300 770 22 90. rbolivarl@unipamplona.edu.co
.** **RWTH-Aachen,** Institute of Process Metallurgy and Metal Recycling (IME). Inteztrasse 3, Aachen, Germany. rbolivarl@unipamplona.edu.co

Resumen: Se obtuvo polvo metálico de titanio (2,98% en peso O) de tamaños de partículas irregulares y semiesféricas entre 0,5 y 3,5 µm mediante reducción magnesiotérmica de TiO_2 y un proceso de purificación por lixiviación. Se evaluó la influencia de la temperatura, tiempo, tamaño de partícula de TiO_2, forma de magnesio, relación molar de Mg / TiO2. Se diseñaron y usaron tres reactores diferentes que debieron soportar alta temperatura y promover las reacciones sólido-líquido y sólido-gas. La mejor configuración resultó cuando se promovió la reacción del modelo de gas sólido.

Palabras clave: Producción de titanio, Metalotermia, Dioxido de titanio.

Abstract: Titanium metallic powder (2.98 wt% O) of irregular and semispherical particles sizes between 0.5 to 3.5 µm was obtained by magnesiothermic reduction of TiO_2 and a leaching purification process. Experiments were carried out to evaluate the influence of temperature, time, size of TiO_2, shape of magnesium and molar ratio of Mg/TiO2. Three different reactors were design and use at high temperature and to promote solid-liquid and solid-gas reaction. The best configuration resulted when solid-gas model reaction was promoted.

Keywords: Titianium production, Metallothermy, Titanium dioxide.

1. INTRODUCCIÓN

Titanium powders can be used as reactive agents in the production of alloys in ferrous and non-ferrous metallurgy; also, in alloying, refining and modifying components to produce titanium carbide and nitride as well as in welding and smelting electrodes. Titanium P/M components can be welded by argon-arc, contact and diffusion welding and processed using metal-cutting machine tools. Titanium powders are readily formed and sintered into components that possess exceptional corrosion resistance, biological inertness, high strength at room and high temperatures, and relative lightness. They are used to produce refractory com-pounds, particulate-reinforced titanium matrix composites, metal–polymer anticorrosive compositions, mechanical components, ceramic-metal porous filters, gas absorbers of electronic vacuum devices, surgical tools, prosthesis, frames for lenses, weapon details, and different components in the automobile, aerospace and chemical industries (Prasad, Ehrensberger, Gibson, Kim, & Monaco, 2015)(Workshop & Pm, 2007)(Yang, Zhang, Dai, & Luo, 2017) (Hurless & Froes, 2002) (Gopienko & Neikov, 2009).In spite of this great properties, titanium is not used commonly in engineering and general applications due to his prices. The high price of titanium is caused by the high technical multi-step production process. Norgate (Norgate & Wellwood, 2006) has estimated that if a low cast production process is developed, reducing price should to be about 50% and the penetration of titanium into new markets could increase to about

220%. The production technology includes different process technology and produced components with a huge range of properties and prices. This variation can be associated with the volume production capacity, cleanliness, handling and kind of process. Generally, prealloy powder (PA) produces high-performance fully dense components but it needs an expensive investment for the special melt stock, ultra-clean handling and compaction tools which increase its price twice as much in comparison with the BE components. Also, for the component produced by each technology the market will be quite different and much more specific. Table 1 estimates the penetration of titanium-powder-made components by the year 2020, when the demand is projected to come close to 18944 yearly metric tons (mt), additive manufacturing (AM) exhibiting the largest projected consumption counts (German, 2009)(Dutta & Froes, 2015)(Froes, 2012)(Bolzoni, Ruiz-Navas, Neubauer, & Gordo, 2012)(Cui, Hu, Zhao, & Liu, 2011)(Vlad, 2008)(Capus, 2017),(Whittaker & Froes, 2015)

Table 1. Projected market penetrations of various PM titanium product types within a 5-year time frame (2020) (Whittaker & Froes, 2015).

Product/technology type	Sector	Tonnes p.a.
Blended Elemental (BE)	Automotive	6800
Additive manufacturing (AM)	Aerospace, motorsport, medical, others	10000
Metal Injection molding (MIM)	Aerospace, medical, other	45
Prealloy Process (PREP)	Aeroengineer parts	2000
Hydride-dehydrided (HDH) material	Automotive, engineering	90
Spray formed products	Surface engineering	9

The recent development of powder metallurgy has proved to be a rapid and economic manufacturing technology which can produce component savings up to about 80% of the total raw material plus energy expenditure. It consumes only half resources in comparison to wrought processes. A synergy between the desired low-cost titanium powder process and the energy and the material savings when powder metallurgy is used could be the way of reducing the final titanium component price leading to a high growth on new application fields. Currently powder production is carried out by high technological processes that use bars of metallic titanium as raw material. In the last two decades, the research race began again to obtain low cost titanium powder directly from its titanium dioxide (TiO_2) or tetrachloride ($TiCl_4$). Electrochemical processes to obtain titanium powder from TiO_2 by reduction through melting calcium or its salts had been researched at the same time by Susuky(Suzuki, Ono, & Teranuma, 2003)(Suzuki & Inoue, 2003) and Fray (FFC process)(Fray, 2001)(Mohandas & Fray, 2004). The Kroll and Hunter processes have improved to produce continuous titanium powder by the Australians (TiRo™ process) (Hongan, L.; McGinn, E.; Kendall, 2008) and the American (Armstrong ITP Process)(Borys, S; Anderson, R. P.; Benish, A.; Jacobsen, L.; Ernst, W.; Kogut, D.; Lyssenko, 2005) respectively. Okabe(Okabe, Oda, & Mitsuda, 2004) researched the direct production of titanium through calciothermic reduction of TiO_2. Unfortunately, nowadays, there is no industrial scale up for these processes to assure a massive production of titanium powder at low cost. This aspect makes this technology more expensive than the production of titanium metal. However, if the powder could be produced directly from titanium dioxide, replacing the expensive steps of titanium metal production by melting and re-melting, its purpose is worthy of investigation. The basis of the idea developed at IME “Process Metallurgy and Metal Recycling, Institute and chair of RWTH Aachen University”, is the direct production of titanium powder by metallothermic reduction from titanium dioxide as can be visualized in Figure 1. The proposed four step process consists in a first reduction of titanium dioxide by magnesium to a low titanium oxygen content, about 2.9 wt%, following an acid leaching step to recover the obtained powder which is used as raw material in subsequent calcium deoxidation process. Finally, another acid leaching step would obtain the low

oxygen content titanium powder. The requirement of the oxygen content depends on the application were the component will be used. Possible new daily applications could use titanium with higher oxygen content than that commonly used in high technical application which gives high range on the process control. The magnesiothermic reduction of titanium dioxide and the subsequent acid leaching are the first and second step of the proposed process leading to a high content of oxygen in the titanium powder. This is the focus of this research (Bolívar & Friedrich, 2009)(C. Oosterhof, Reitz. J, Bolivar. R, 2010).

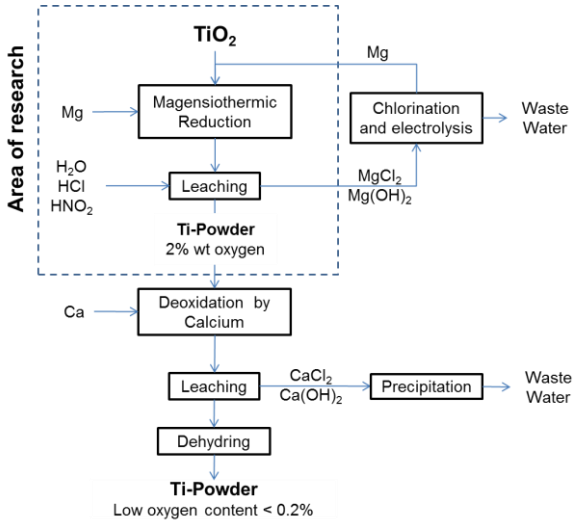


Fig. 1. Proposed process to produce titanium powder by magnesiothermic reduction from Rutile

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Raw materials

The experiments were carried out using pure magnesium of ≥ 99.9 wt% and titanium dioxide powder "Kronos 3000" with the following properties: TiO_2 purity ≥ 99 wt%, size distribution 86 wt% of particles > 100 µm and 0.2 wt% of particles < 800 µm, X_{50}-Value (media size particle) of 200 µm. The studied variables were 1) temperature, 2) molar composition ratio φ, 3) sizes of TiO_2, 4) shape of Mg, 5) reaction time and 6) kind of reactor. Three different reactors were used in order to provide the possibility to investigate the mechanism reaction.

2.1. Magnesiothermic reduction

2.2.1 Reactor I

The first reactor (RI) was made of normal carbon steel DIN 1.0402 (Figure 2) with a capacity of 500 ml and some gadgets on top for temperature measurement and protective gas injection. Argon (2 l/min) was injected into both the reactor and the furnace during the experiments. Magnesium (95 g) in different shapes (in cubes, plates or turnings) and titanium dioxide powder (the amount depends on the molar ratio, labelled "φ"). These were always placed in contact with each other within the reactor. Magnesium was generally placed at the bottom and then TiO_2 was poured on top of it.

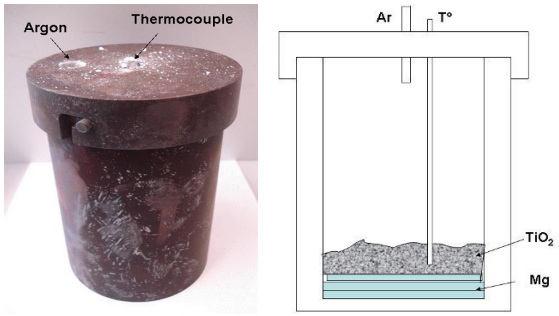


Fig. 2. Reactor I (RI) with facilities to inject protective gas and to measure temperature.

In reactor I three different experimental series were conducted use factorial experimental design statistical methodology. The assessment criterion was the grade of the reduction which was valued by the amount of the strongly reduced product obtained.The following parameters and characteristics were investigated in this reactor: Starting temperature of the reaction, product distribution in the reactor, influence of the set temperature (710°C or 850°C), influence of the size and shape of magnesium (turnings, plates and cubes in 20 mm wide) or cubes (20*20 mm), influence of the size of titanium dioxide particles (710°C or 850°C), influence of the molar ration φ (2.5 or 4), pathway of the reaction with mixed reagents (liquid-solid mechanism). One replica of each trial was always carried out in order to obtain a minimum statistical concordance. For each experimental series carried out on the different reactors, an analysis of variance was calculated in order to

identify the influence of the dependents variables on the degree of reduction.

2.2.2 Reactor II

The second reactor (RII, Figure 3) was built with high elevated-temperature strength stainless steel DIN 1.4841. The 500 ml capacity reactor could support a pressure of 9.8 bars at 1000°C. The reactor was sealed by a blind flange, screws and a gasket seal. Sponge titanium lumps were placed as getter into the reactor, in order to remove the enclosed air by forming titanium oxides and nitrides.



Fig. 3.Sealing reactor II of special steel to support 9.8 bars at 1000°C.

Two different experimental series were implemented the using factorial experimental design. In this reactor the following influences were studied. Reactant agents in separated form (Gas-liquid mechanism on pathway reaction), degree of reduction, influence of the set temperature (850°C or 1000°C), particle size of TiO_2 powder (as received, +355 µm, pellets 1cm), molar ratio φ (2.5 or 4), holding reaction time (90 or 240 min)

2.2.3 Reactor III

The last (RII, Figure 4) design was a tube reactor formed by two different compartments joined by a joint flange in-between (Figure VIII). Each compartment had a capacity of 350 ml. It was made from high elevated-temperature strength stainless steel DIN 1.4841. The reactor was sealed on its ends with blind flanges and screws made out of the same material. A gasket of "Sigraflex® Economy" was used as well. The reactor was designed to support pressure of 9.8 bars at 1000°C. It was heated in a rotary furnace (2 rpm) with facilities to inject argon (2 l/min) as protecting gas. The trials were carried out on an atmosphere controlling rotating furnace. Sponge titanium was placed into each compartment to remove the enclosed air by reaction at low temperature. Three different experimental series were implemented the using factorial experimental design. In this reactor the following influences were studied: reactant agents with each other or in separated form (Gas-liquid and solid-liquid reaction), temperature of starting of reaction at 1030°C and partial pressure vapor Mg of 0.58 bar by special blind plug of nickel vapor gas of magnesium, degree of reduction, influence of the set temperature (850°C or 1100°C), molar ratio φ (2.5 or 4), holding reaction time (90 or 240 min)

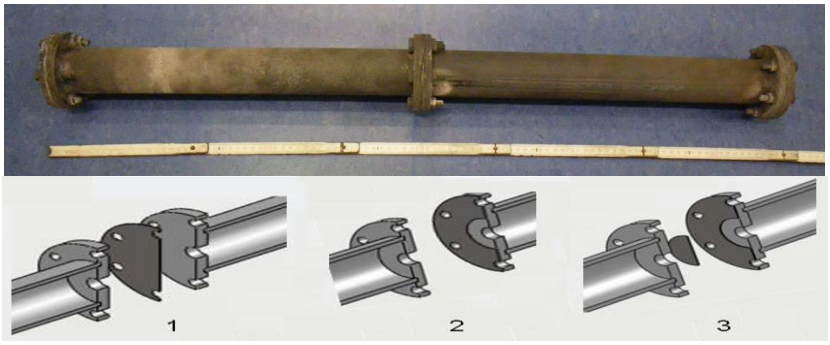


Fig. 4. Up. Reactor III with two compartments. Down. Different configuration for Reactor III.

2.3. Products characterization

Five kinds of particles grouped of different grades of reduction and commonly grouped in the form of sinter cake or placed on a specific place of the reactor. These were obtained during the reduction from different conditions studied. Grey strong reduced particles, black metallic intermediate

reduced, black no metallic weakly reduced, no reduced TiO_2 and another one. The strong and intermediate reduced particles are called SRP (strongly reduced product) and the weakly one is WRP (Weakly reduced product). Those products, also SRP and WRP were obtained alone or as a mixture, depending on each particular configuration in the trial. They can be separated by hand and classified by it colour and texture, and where leaching in a different acid solutions. The intermediate product and final obtained powder was analysed by ICP, XRD, SEM, EDX and optical microscopy. The other products were the sub-products of the magnesiothermic reduction; such as, MgO, $MgHN_3$. Titanium dioxide without any reaction was observed as well. The last one was hardly observed.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Products of the magnesiothermic reduction

3.1.1 Strongly reduced product

The strongly reduced products (SRP) exhibit two different colours (Figure 5). The first one is grey silver particles which form a sinter-cake of metallic appearance and is obtained in trials where the reagents are place in contact with each other or separately. The second one is a black metallic detachment powder produced in trials where the reagents were placed separately and only a reaction gas-solid was allowed to run. XRD pattern of the grey silver particle (Figure 6) shows metallic titanium (Ti), a low proportion of sub-oxide (Ti_2O), magnesium oxide (MgO) and metallic magnesium (Mg).

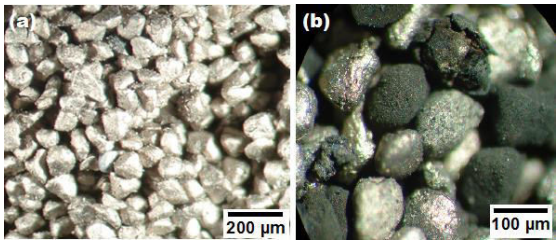


Fig. 5. The strongly reduced product (a) grey metallic appearance (b) black metallic appearance

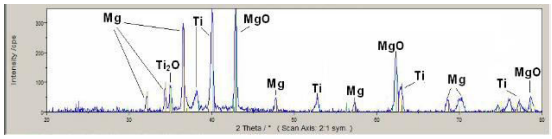


Fig. 6. XRD patterns of the grey silver metallic strongly reduced product.

The XRD pattern of the black metallic shows that titanium metal (Ti) and magnesium oxide (MgO) are its main components, together with low peaks of Quandilite ($Mg_{1.5}Ti_{1.5}O_4$), titanium oxide (Ti_2O_3) and suboxide (Ti_2O) (Figure 7). Although the peaks of Ti and MgO phases show higher intensity in comparison to the $Mg_{1.5}Ti_{1.5}O$, Ti_2O and Ti_2O_3 ones, the presence of those products suggests a partial reduction in some places.

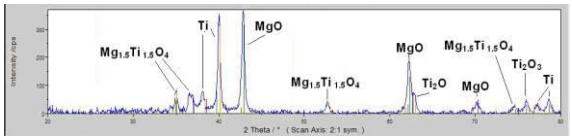


Fig. 7. XRD patters of the metallic black strongly reduced product

3.1.2. Weakly reduced product

This kind of product was obtained together with the strongly reduced product in almost all cases when the reactants were placed in contact with each (reactor I and some configuration of reactors II and III) or as a single product when a nickel blind plug was used on the reactor III. The XRD pattern shows that titanium and magnesium oxide are the principal phases and the quandilite ($Mg_{1.5}Ti_{1.5}O_4$) and titanium oxide (TiO_2 and Ti_2O_3) phases are in a lower proportion (Figure 8)

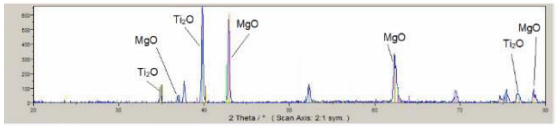


Fig. 8. XRD patters of the weak reduced part of product.

3.2 Impact of parameter variation on magnesiothermic reduction

3.2.1 Influence of the molar composition ratio (φ)

The molar composition ratio was only taken into account when the reactants were in contact with

each other (Figure 9). The maximum degree of reduction that theoretically could be reached by the magnesiothermic reduction depends on the molar composition ratio (φ) and reaction temperature lower than 1400°C. If the reactants are in contact with each other, the heat generated during the reduction process is used to melt/evaporate the magnesium bulk and to maintain the self-propagating reaction. The reaction starts invariably at 650°C, the fusion temperature of magnesium. At φ values as high as 4 a big share of the energy generated by the exothermal reaction is used to melt/evaporate most of the magnesium material, while only a minor part is employed to heat the reaction bed. This determines a low reaction temperature, which prevents the re-oxidation of the already reduced titanium. In turn, the highest strongly reduced product (SRP) yield was obtained. Nevertheless, at low φ = 2.5, the effect is opposite; a big share of the generated heat is used to evaporate magnesium and increase the temperature of the TiO_2 bed, even coming close to 1400°C. This leads to a reoxidation of the evolved titanium to its sub-oxides, thus resulting in lower amounts of SRP.

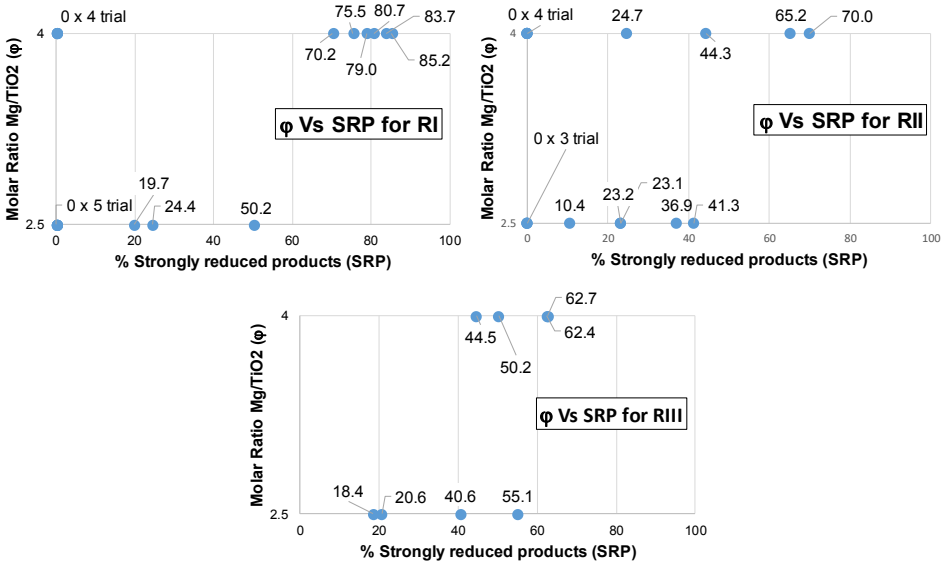


Fig. 9. Influence of the molar ratio Mg/TiO2 (φ) on the strongly reduced product (SRP).

The analysis of variance (Anova) for the RI and RII experimental series shows that the molar composition ratio influences the SRP at fairly low probability rates (44.7% for RI and 51.7% for RII), which implies that the independent effect of this variable on SRP is relatively weak. However, in the case of RIII the probability that φ influences the produced amount of strongly reduced product (SRP) is 99.4%, which implies a strong independent effect on SRP.

3.2.2 *Set temperature and holding reaction time*

Set temperature and time for preheating were investigated for every reactor and can be considered as a "soaking time and temperature". The set temperature was fixed by the experimental plan and achieved by adjusting the furnace temperature. The holding reaction time started when the furnace achieved the set temperature. Based on the experimental results obtained from RI, RII and RIII and their corresponding statistical calculations, it can be concluded that holding time and set temperature have no influence on the amount of strongly reduced product obtained in those experiments in which the reactants were in contact with each other. The analysis of variance for the experimental series of RI and RII showed that temperature influences SRP at a fairly low probability rate (51.1% for RI, 61.7% for RII and 79.8% for RIII), thus implying a relatively weak independent effect of this variable on SRP. In the case of holding time in RII, this effect was 61.7%.

3.2.3 The shape of magnesium used for reduction

The form of magnesium becomes important for the degree of reduction only when the reagents have been put into contact with each other. Magnesium was used as cubes, plates and turnings in RI. The analysis of the result of first experimental series for RI and the anova calculation for the second one show that the influence of shape of magnesium over of SRP obtained is 100%. Due to this fact, only plates of magnesium were used on RII and RIII. The other shapes as cubes or turnings never obtained the SRP as can be observed on Figure 10.

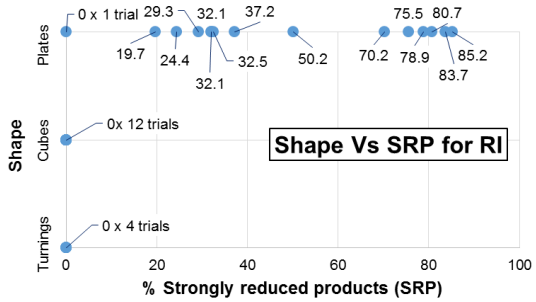


Fig. 10. Influence of the shape of magnesium on the percentage of strongly reduced product.

When plates are used, an initial liquid-solid reaction model occurs only in the small portion of the TiO_2 bed that is in contact with the sides of the plates. The heat thus generated is enough to both melt the quasi-liquid magnesium and evaporate a part of it. The vapor flows through the bed and a bubble fluidized bed structure which produces SRP is evolved, thus conforming to a gas-solid reaction model. The heat generated by the reaction gradually evaporates the remaining liquid magnesium or is lost through the reactor's wall. This prevents both a large temperature increase in the bed and, consequently, the re-oxidation of already reduced titanium. The excess of magnesium vapor is condensed on top of the bed, and a liquid-solid reaction starts again. Also in this case, titanium forms a metallic coating, this time because the heat is not enough to re-oxidize it. Thus, a strongly reduced product is obtained.

3.2.4 *Particle size and form of the titanium oxide*

TiO_2 particle size only had a strong influence (99.9%) on the obtained SRP when the reagents were in contact with each other (Figure 11); there was no movement and plate shaped magnesium particles were used. In these conditions, particles > 355 µm ensured a higher void volume than smaller ones and the process yielded up to 70% SRP. Provided that magnesiothermic reduction in those trials are dominated by the gas-solid reaction model, and that the void volume has a considerable effect on the behavior of the bed with regard to the flow of the reactive gas, it follows that the effect of size can be observed and demonstrated statistically. However, in other experimental configurations where pellets or other particle sizes were used, no influence of size on SRP yield was observed. In RIII (particle size as received), where the trials were carried out in a rotary furnace to guarantee the continuous movement of the TiO_2 powder, a homogeneous reaction was observed through the whole dioxide bed. Some trials rendered 100% SRP, while others rendered only weak ones, demonstrating again no influence of TiO_2 particle size.

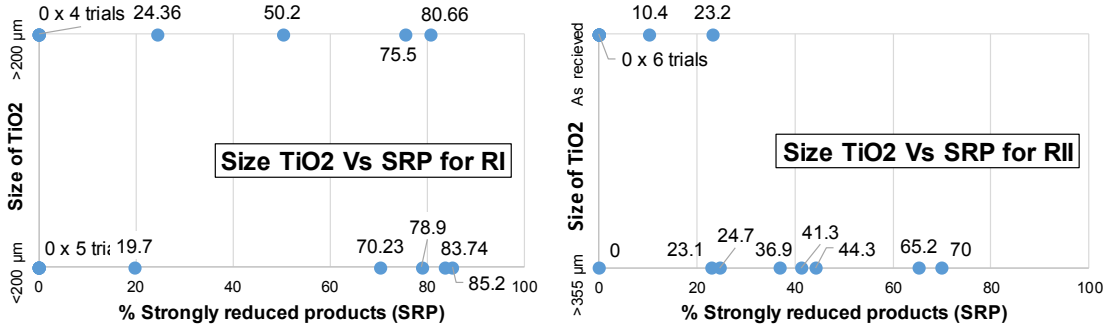


Fig. 11. Influence of TiO_2 size on the strongly reduction products.

3.3 The obtained powder

After a leaching acid treatment leached (8 HCl% + 3 HNO_3%) to purified the titanium powder from magnesium, titanium oxides, magnesium titanates and some elements dissolved from the reactor as Fe, Ni, Cr, the obtained powder was analysed by SEM and EDX. The EDX chemical analyzes show that the oxygen content in the strongly reduced particles exhibit a share from 2.9 wt% to 7.46 wt% with an average of 4.23 wt%. Chloride was not found on the powder. The powders exhibit different morphologies, such as equiaxed as well as spherical particles and their size is on the order of the nanometres. In order to obtain a quantitative value of the degree of reduction from TiO_2 to Ti in the obtained products, the amount of oxygen was fixed as the reference parameter. Provided that TiO_2 contains 40.03 wt% oxygen while grade 1 commercial titanium contains 0.18 wt% oxygen, it was established that a degree of reduction of 0% corresponded to 40.03 wt% oxygen. Correspondingly, a 100% degree of reduction was assigned 0.18 wt% oxygen.

Morphology of powder from RI (Gas Protective Reactor)

At lower temperatures, such as 850°C and short times of 30 minutes titanium metal was formed with a high content of oxygen (about of 12.7 ± 3 wt%; corresponding to a reduction degree of 68.58%). The titanium particles (Figure 12a) exhibit a distribution size from 0.1 µm to 1.4 µm. Their general shape is semi-spherical but some of the bigger ones exhibit an angular morphology. Porosity produced by nucleation and releasing of MgO could only be observed on the bigger particles. The size and quantity of small particles suggest a quick transformation to the TiO_2 to Ti metal, which agrees with the pathway proposed and the chemically driven consideration. The EDX shows that the oxygen content is approximately 12.7 wt%, leading to a degree of reduction of 68.58% (Table IV).

Morphology of powder from RII (Sealed Reactor)

The titanium particles of the SRP (Figure 12b) exhibits a distribution size from 0.28 µm to 0.96 µm. Their shape is similar to RI but the semi-spherical shape is more abundant than the angular ones. The EDX shows the presence of oxygen and magnesium. The oxygen content is approximately 4.02 wt% (90.36% degree of reduction), with magnesium only on point 2 with 1.98 wt%.

Morphology of powder from RIII (Two Compartment Reactor)

Three different morphologies were observed in the SRP obtained using Reactor III, depending on variations in the processes, as described in the following:

Equiaxed particles: The particles from trials in which the reagents were in contact with each other were obtained under the following conditions: set time was for 4 hours, molar ratio φ = 4, and set temperature was 1100°C. These particles exhibited an equiaxed form with holes on their surface (Figure 12c) Particle size ranges from 0.5 µm to 3.5 µm. The SEM micrograph renders a facetted growth of the titanium particle from the prior magnesium titanates particle. The prior ones are decomposed on both MgO and titanium particles. The MgO particles are released leaving behind a high porosity of octahedral holes on the surface, which is then transformed into titanium metal by the removal of magnesium and oxygen. This micrograph shows larger particles than the other sample; it could be that the smaller particles have been adsorbed by the bigger ones in a ripening process promoted by the high temperature and longer time. The titanium particle shapes are semi-spherical. The EDX shows the presence of oxygen and magnesium. The oxygen content is approximately 4.38 wt% (89.46% degree of reduction), and magnesium is only on point 1 with 2.79 wt%.

Spherical and semi-spherical particles: Two different morphologies (Figure 12d) were observed in strongly reduced products obtained under the same conditions: reagents separated from each other, 4 hours set time, molar ratio of 4 (φ = 4) and set temperature of 1100°C.

The first one of these morphologies corresponded to spherical and semi-spherical titanium particles with a 0.53 µm to 1.93 µm size. They were detached from the continuous matrix structure under a “free flow” behavior mode. Besides those two morphologies, an

angular monolithic material was observed, containing an elevated amount of nickel (circa 52 wt%) that suggests chemical reactions between some of the reactants and the nickel contained in the high temperature resistant steel alloy of the reactor´s wall. The EDX shows that the oxygen content is approximately 3.25 wt%, leading to a degree of reduction of 92.29%.

The second morphology corresponds to a continuous titanium matrix spotted by traces of small, detached titanium particles (Figure 12e) that had been absorbed by the matrix. Small cavities on its surface, left by leached MgO were observed as well. This confirms the formation of a continuous matrix resulting from facetted growth by a sinter/ripening process. The EDX shows that the oxygen content is approximately 5.22 wt%, leading to a degree of reduction of 87.35%.

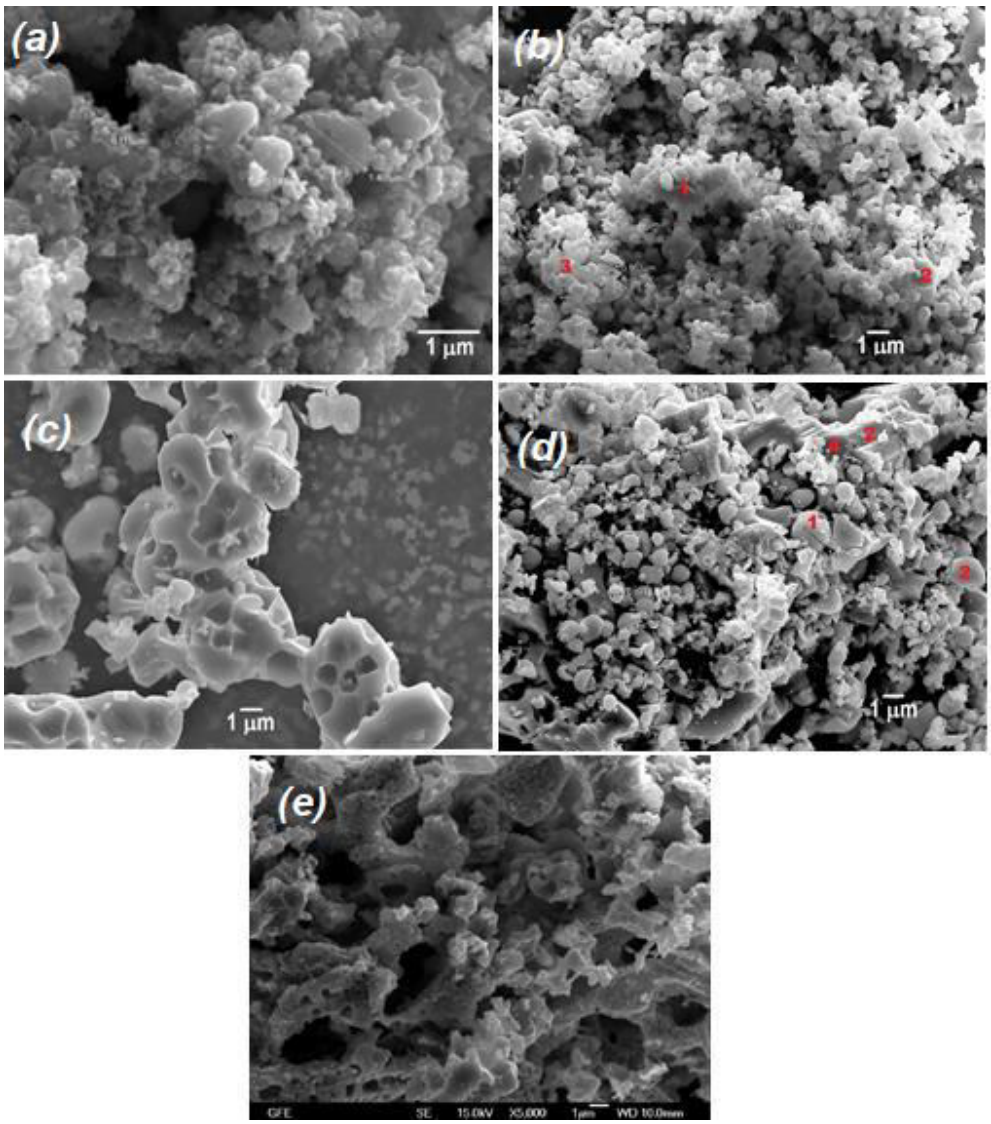


Fig. 12. SEM of the SRP powder obtained from (a) RI; (b) RII, (c) RIII equiaxed, (d) RIII semispherical (e)RIII continuous

4. CONCLUSION

In the second configuration of rotary tube reactor, where the reactants were separated with each other through a rotational movement and the incipient magnesium gas was instantly allowed to react with the titanium oxide, 100% strongly reduced product (SRP) was obtained. Under this configuration, the amount of evolved gas depends only on the increase of the furnace temperature, thus entailing that only a small fraction of the gas is available for the reaction. Furthermore, the movement ensures a homogenous reaction and distribution of the products. On the other hand, when magnesium gas was allowed to react at 1030°C (0.68 bar) and the available gas was enough to complete the reaction, only weakly reduced product was obtained.

Among the variables studied when the reactants were in contact with each other, such as size of the TiO_2 powder, set temperature, holding time, shape of the magnesium, time and molar ratio Mg/TiO_2 only both shape of magnesium and molar ratio Mg/TiO_2 influenced the degree of reduction. The shape of the magnesium is directly related to the reaction area. The use of cubes or turnings result in a high flash reaction under a gas-solid model generating high temperature on the reaction bed which produces only weakly reduced product by re-oxidation of the titanium obtained at the beginning of the reaction. Plate with lower reaction area results in a small share of liquid-solid model and a maximizing the gas-solid one, obtaining more quantity of the strongly reduced product. However, the evaporation of magnesium takes more time and conduces the magnesiothermic reaction slower than the other shapes, sure a high quantity of strongly reduction products.

The semi-spherical titanium particles obtained was approximately of 0.5 μm size with a content of oxygen on an average of 3.25 wt% on average, corresponding to a degree of reduction of 92.3% referring to TiO_2. Lower oxygen concentration was reached in some trials to about of 2.9 wt%, degree of reduction about 93.17%. No chlorine contamination was detected via EDX. The shape of the titanium powder was not homogeneous, and it depended on condition of the trial. Generally, small and detached equiaxed and semi-spherical particles were obtained when reactants were in contact, but when they are placed separately, a continuously sinter structure of big and small particles was obtained. The rough surface structure of the powder morphology results from the formation and releasing of magnesium oxide micro particles on the surface of the raw particles. Very small particles of titanium metal make this sub-micron powder hardly usable for the blended elemental powders (BED) and pre-alloyed powders (PE) processes, where the requirement size is bigger than 25μm, they could be ideal to use on both Powder injection Molding (PIM) or Metal Injection Molding (MIM).

REFERENCES

Bolívar, R., & Friedrich, B. (2009). *Synthesis of titanium via magnesiothermic reduction of TiO2 (Pigment). Proceedings - European Metallurgical Conference, EMC 2009* (Vol. 4). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11374.61760

Bolzoni, L., Ruiz-Navas, E. M., Neubauer, E., & Gordo, E. (2012). Inductive hot-pressing of titanium and titanium alloy powders. *Materials Chemistry and Physics*, *131*(3), 672–679. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.10.034

Borys, S; Anderson, R. P.; Benish, A.; Jacobsen, L.; Ernst, W.; Kogut, D.; Lyssenko, T. (2005). Development Status of the Armstrong Process for Production of Low Cost Titanium Powder. In *Aeromat 2005*. Orlando.

C. Oosterhof, Reitz. J, Bolivar. R, B. F. (2010). Potentiale alternativer Herstellungskonzepte für Titanmetall und Titanlegierungen. In *44. Metallurgische Seminar des Fachausschusses für Metallurgische* (pp. 131–162).

Capus, J. (2017). Titanium powder developments for AM – A round-up. *Metal Powder Report*, *72*(6), 384–388. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mprp.2017.11.001

Cui, C., Hu, B., Zhao, L., & Liu, S. (2011). *Titanium alloy production technology, market prospects and industry development*. *Materials & Design - MATER DESIGN* (Vol. 32). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.011

Dutta, B., & Froes, F. (2015). *The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys*.

Advanced Materials Research (Vol. 1019). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00024-1

Fray, D. J. (2001). Emerging molten salt technologies for metals production. *JOM*, *53*(10), 27–31. https://doi.org/10.1007/s11837-001-0052-5

Froes, F. H. S. (2012). Titanium Powder Metallurgy: A Review – Part 1. *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*, 16–22. Retrieved from https://www.asminternational.org/documents/10192/1877324/amp17009p16.pdf/2df24a9d-754d-4801-8aa1-3759cf4e6b64

German, R. (2009). *Titanium powder injection moulding: A review of the current status of materials, processing, properties and applications*. *Powder Injection Moulding International* (Vol. 3).

Gopienko, V. G., & Neikov, O. D. (2009). Chapter 14 - Production of Titanium and Titanium Alloy Powders. In *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications* (pp. 314–323). Oxford: Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-422-0.00014-8

Hongan, L.; McGinn, E.; Kendall, R. (2008). *Research and development in titanium implications for a titanium metal industry in Australia*.

Hurless, B. E., & Froes, F. H. (2002). *Lowering the cost of titanium*. *The AMPTIAC Quarterly* (Vol. 6).

Mohandas, K. S., & Fray, D. (2004). *FFC Cambridge process and removal of oxygen from metal-oxygen systems by molten salt electrolysis: An overview*. *Transactions of the Indian Institute of Metals* (Vol. 57).

Norgate, T. E., & Wellwood, G. (2006). The potential applications for titanium metal powder and their life cycle impacts. *JOM*, *58*(9), 58–63. https://doi.org/10.1007/s11837-006-0084-y

Okabe, T. H., Oda, T., & Mitsuda, Y. (2004). Titanium powder production by preform reduction process (PRP). *Journal of Alloys and Compounds*, *364*(1), 156–163. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00610-8

Prasad, S., Ehrensberger, M., Gibson, M. P., Kim, H., & Monaco, E. A. (2015, November 1). Biomaterial properties of titanium in dentistry. *Journal of Oral Biosciences*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.job.2015.08.001

Suzuki, R. O., & Inoue, S. (2003). Calciothermic reduction of titanium oxide in molten CaCl2. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *34*(3), 277–285. https://doi.org/10.1007/s11663-003-0073-2

Suzuki, R. O., Ono, K., & Teranuma, K. (2003). Calciothermic reduction of titanium oxide and in-situ electrolysis in molten CaCl2. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *34*(3), 287–295. https://doi.org/10.1007/s11663-003-0074-1

Vlad, A. I. O. (2008). Innovative powder metallurgy process for producing low cost titanium alloy component. In *Titanium 2008*. Las Vegas.

Whittaker, D., & Froes, F. H. (Sam). (2015). 30 - Future prospects for titanium powder metallurgy markets BT - Titanium Powder Metallurgy. In *Titanium Powder Metallurgy* (pp. 579–600). Boston: Butterworth-Heinemann. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800054-0.00030-7

Workshop, M. I. M. T., & Pm, E. (2007). Developments in the powder injection moulding of titanium. *Powder Metallurgy*.

Yang, Y., Zhang, C., Dai, Y., & Luo, J. (2017). Tribological properties of titanium alloys under lubrication of SEE oil and aqueous solutions. *Tribology International*, *109*, 40–47. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.040

COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y TRIBÓLOGICO DE BUJES PARA ELECTRODOMESTICOS OBTENIDOS POR PULVIMETALURGIA CON ADICIÓN DE ESTAÑO O ZINC

MECHANICAL AND TRIBOLOGIC BEHAVIOR OF BUSHINGS FOR APPLIANCES OBTAINED BY POWDER METALLURGY WITH TIN OR ZINC ADDITION

Juan Pablo Candelo Gonzalez

Universidad Autonoma de Occidente**,** Facultad de ingeniería, Programa ingeniería mecánica, Grupo de Investigación en ciencia e ingeniería de materiales (GCIM).
Cll 25#115-85 Km 2 Vía Cali-Jamundí, Valle del Cauca, Colombia.
+57 032 3188000
E-mail: juan_pablo.candelo@uao.edu.co

Resumen: La empresa MVM Ltda. se encuentra en un proceso de desarrollo de bujes para ventiladores en aleación de cobre dentro de su línea de bujes para electrodomésticos fabricados a partir de pulvimetalurgia. Como MVM Ltda. requiere minimizar costos para aumentar su competitividad en el mercado, la empresa decide lanzar en su línea de producción una nueva referencia que resulte más económica, pero que además que mantenga la calidad que caracterizan a los productos MVM.

Con el fin de validar las propiedades mecánicas y tribológicas de la nueva referencia, con respecto a las referencias comerciales actuales, se determinó la dureza Vickers de las diferentes referencias de bujes; la perdida de material por desgate y el coeficiente de fricción dinámico mediante el ensayo pin on disk. Se realizó un análisis de la microestructura presente en los materiales por medio del ensayo de microscopia electrónica SEM. Por último se evaluó la estabilidad térmica de los materiales a temperatura de sinterización de los bujes mediante Termogravimetría.

Palabras clave: Pulvimetalúrgia – bujes – prensado – sinterizado – tribología – dureza – desgaste superficial

Abstract: . MVM Ltda. company is in the process of developing bushings fans inside its line of household appliances bushings. The bushings are manufactured in copper alloy by powder metallurgy process. As MVM Ltda. requires minimizing costs to increase its competitiveness, they decide to launch a new reference in their production line, the new reference must be more economical, and its mechanical and tribological properties must be equal to or better than the commercial references.

To validate the mechanical and tribological properties of the new reference, and the commercial references, was necessary determined Vickers hardness of the different

bushing references; the loss of material and the dynamic friction coefficient through the pin on disk test. An analysis of the microstructure present in the materials was determinated through SEM scanning electron microscopy test. Finally, the thermal stability of the materials at the sintering temperature of the bushings was evaluated by thermogravimetry.

Keywords: Powder metallurgy - bushings - pressing - sintering – tribology

1. INTRODUCCIÓN

Los bujes al ser elementos que operan bajo alta exigencia mecánicas, requieren de avanzados procesos de manufactura, para otorgarle buenas propiedades mecánicas y tribológicas. MVM Ltda. es una empresa que produce actualmente dos referencias estándar de bujes para ventiladores, CT500 (95%Cu y 5%Sn) y CT1000 (90%Cu y 10%Sn) las cuales son producidas con material en polvo importado mezclado por el fabricante de la materia prima. Estas mezclas en su mayor parte se encuentran compuestas por cobre, pero varía el porcentaje de material de aporte (estaño), por lo que hay diferencia tanto en propiedades mecánicas y tribológicas, como en costos de producción y comercialización entre estas dos referencias.

MVM Ltda. Necesita lanzar una nueva referencia de bujes para ventiladores, la cual tenga un menor valor de producción, pero sin sacrificar la calidad que tienen los bujes comerciales CT500 (95%Cobre y 5%Estaño) y CT1000 (90%Cobre y 10%Estaño), ya que este es el gran atractivo que ven los clientes en los productos. Así que la empresa produjo un lote de bujes compuestos por 92%Cobre y 8%Zinc, basado en investigaciones realizadas a nivel mundial, y en base de experiencia en el tema. Pero antes de lanzar la nueva referencia de bujes al mercado, es necesario verificar las propiedades mecánicas y tribológicas del material, para evitar problemas con la calidad requerida por los clientes de estos bujes.
Como segunda opción para disminuir costos de producción y aumentar la competitividad de la empresa en el mercado, la empresa quiere disminuir los costos de maquila para la fabricación de los bujes comerciales CT500 y CT1000, en este caso para el proceso de mezclado de polvos metálicos, dicho proceso es actualmente realizado por la empresa que produce los polvos metálicos. Así que la empresa decide fabricar una serie de bujes con las mismas proporciones de materiales que las referencias comerciales, solo que el proceso de mezclado se realizó en la planta de MVM, a estos bujes se les denoto como MVM500 (95%Cobre 5%Estaño) y MVM1000 (90%Cobre 10%Estaño)

Con este proyecto, se pretende analizar las características mecánicas y tribológicas de bujes auto lubricados fabricados por MVM a través de metalurgia de polvo, con diferentes porcentajes de estaño o zinc en su composición, para posteriormente seleccionar la mejor adicción. Esta investigación se realizará con el grupo de investigación GCIM de la Universidad Autónoma de Occidente y la empresa MVM Ltda. con el fin de determinar cuál de los elementos estaño o zinc es el más apropiado para adicionarle a los bujes para un mejor desempeño y que compita en calidad y costos con bujes importados. Para esto se realizaron pruebas de micro dureza, prueba de Pin on Disk para encontrar las propiedades tribológicas de los materiales, ensayo de microscopia electrónica de barrido para analizar la microestructura. Y finalmente prueba de termogravimetria para simular el proceso de sinterizacion.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Micro Dureza

Para la prueba de micro dureza o Dureza Vickers a los bujes autolubricados, se utilizó un durómetro equipado con un indentador Vickers de marca Zwick. La prueba fue realizada bajo la norma

ASTM e384 "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials" . A la probeta, se le tomaron medidas de dureza en diferentes lugares de manera aleatoria, con una distancia considerable entre cada indentación, con el fin de no alterar las mediciones, y se determinó el valor promedio de HV para cada una de las referencia de los bujes, la carga aplicada fue de 0,5Kg.f

Ensayo Pin-on-Disk

Este ensayo fue realizado a través de un tribómetro para ensayo Pin-on-Disk fabricado por Microtest**.** Los parámetros de operación utilizados para el ensayo de desgaste, registrado en la tabla 1 surgieron a través de la norma ASTM G99 "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus", y de parámetros reportados en estudios a materiales de este tipo por Rodríguez A. en su trabajo de investigación.

Tabla 1 parametros de entrada para ensayo Pin-on-Disk

Parámetros	Valor
Radio de recorrido (mm)	5,5
Recorrido total (m)	1000
Velocidad (rpm)	300
Peso aplicado a la muestra (N)	5

Microscopia electrónica de barrido SEM

El ensayo SEM se le realizó a una sección de los bujes, con el fin de observar la microestructura presente en las muestras. El ensayo se realizó acorde a las normas ASTM E986-97 "Standard Practice for Scanning Electron Microscope Beam Size Characterization", y ASTM E1508-98 "Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy".

Como las muestras se encontraban encapsuladas en baquelita, se previamente se aplicó una delgada película de oro para permitir la conductividad entre el portamuestra y la muestra. Este proceso se realizó con un aplicador de recubrimientos.

Termogravimetría

Las muestras seleccionadas para realizar el estudio de descomposición térmica, fueron obtenidas a partir de los diferentes materiales en polvo que el fabricante de los bujes (MVM Ltda) utilizan para la conformación de estos. Las tres mezclas (95%Cu 5%Sn; 90%Cu 10%Sn; 92%Cu 8%Zn) de materiales se introdujeron en diferentes capsulas de aluminio y posteriormente se sellaron.

Una vez sellada la capsula portamuestra, se ubicó en la plataforma del equipo y a través del software se le indicó al analizador que ubicara la capsula en la balanza por medio de un sistema electromecánico. El ensayo se realizó con el fin de simular el proceso de sinterización por lo que se definieron las variables de ensayo registradas en la tabla 2.

Tabla 2 Variables para el ensayo TGA

Variable	TGA
Tasa calentamiento (°C/min)	20
Masa (mg)	3
Temperatura inicial (°C)	25
Temperatura final (°C)	870
Atmósfera	Nitrógeno

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dureza

Como resultado de las indentaciones y la toma de datos realizados con el durómetro Vickers se presentan las durezas (HV) para los diferentes materiales en la tabla 3

Tabla 3 Dureza Vickers para los diferentes materiales

	Referencias de Bujes				
Prueba	**CT 500**	**MVM 500**	**CT 1000**	**MVM 1000**	**MVM 300**
P1	36	37	42	45	27
P2	41	38	44	41	28
P3	37	36	46	42	26
P4	37	37	44	42	26
Promedio	**38**	**37**	**44**	**43**	**27**
Desviación estándar	2,33	0,67	1,59	1,58	1,13

Se observa que el material con mayor dureza Vickers (HV) es el de referencia CT1000, seguido con un valor muy cercano por el material de referencia MVM1000, lo cual era esperado por la similitud de proporciones en los materiales base y en los de aporte. De igual forma las referencia CT500 y MVM500 tuvieron valores de dureza muy cercanas entre ellas, pero como se esperaba, menores comparadas con las referencias CT1000 y MVM1000. El menor valor de dureza lo obtuvo la mezcla MVM300, y con gran diferencia respecto a las otras mezclas.

Pin-on-Disk

Para el coeficiente de fricción, se tiene que los menores valores obtenidos fueron por la referencia CT1000, seguido muy de cerca por la referencia MVM1000, y tras realizar un análisis estadístico de varianzas, resulto que no hay diferencia significativas entre ellas, así que ambas producen el mismo efecto sobre el coeficiente de fricción dinámico. La referencia MVM500 estuvo en tercer lugar seguida de la referencia CT500 pero en este caso si hubieron diferencias significativas, finalmente la referencia MVM300 resulto con los más altos valores de coeficiente de fricción dinámico. En l tabla 4 se puede observar algunos de los valores promedios.

Tabla 4 coeficiente de fricción dinámico promedio

	Promedios de coeficiente de fricción dinámico μ paras las diferentes referencias				
Prueba	**CT500**	**MVM 500**	**CT 1000**	**MVM 1000**	**MVM 300**
P1	0,274	0,228	0,209	0,230	0,341
P2	0,361	0,240	0,144	0,237	0,332
P3	0,333	0,271	0,216	0,225	0,350
P4	0,322	0,296	0,351	0,216	0,358
Promedio	0,323	0,259	0,230	0,227	0,345
Desviación estándar	0,036	0,030	0,086	0,008	0,011

Para la perdida de masa, los menores valores fueron obtenidos por las muestras de los bujes de referencia MVM1000segudo por las muestras de referencia CT1000. De igual manera la referencia MVM500 obtuvo menores valores de pérdida de masa por degaste en comparación con la referencia CT500. Finalmente las muestras de referencia MVM300 fueron las que más perdieron masa durante los ensayos. Esto es evidenciado en la tabla 5 mostrada a continuación.

Tabla 5 pérdida de masa por desgaste promedio

	Pérdida de más para las diferentes referencias en gr				
Prueba	**CT500 (g)**	**MVM 500 (g)**	**CT 1000 (g)**	**MVM 1000 (g)**	**MVM 300 (g)**
P1	0,0037	0,0014	0,0023	0,0002	0,0047
P2	0,0029	0,0021	0,0004	0,0004	0,0038
P3	0,0029	0,0005	0,0017	0,0002	0,0040
P4	0,0021	0,0004	0,0014	0,0002	0,0061
Promedio	0,0029	0,0011	0,0015	0,00025	0,00465
Desviación estándar	0,0007	0,0008	0,0008	0,0001	0,00104

Microscopia electrónica de barrido SEM

En las figuras 1 y 2 se aprecian micrografías de las muestras de referencia CT1000 y MVM1000 respectivamente, a 100 aumentos. Aunque el proceso de reprensado reduce la porosidad en el material, se observa gran cantidad de poros distribuidos a lo largo de su estructura.

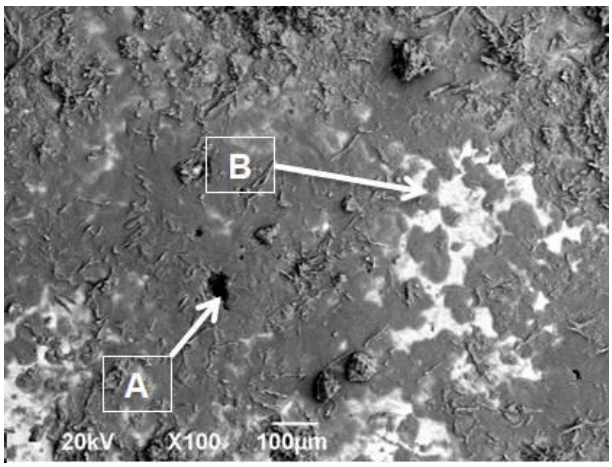


Figura 1 Micrografías SEM a 100X de bujes de referencia CT500.

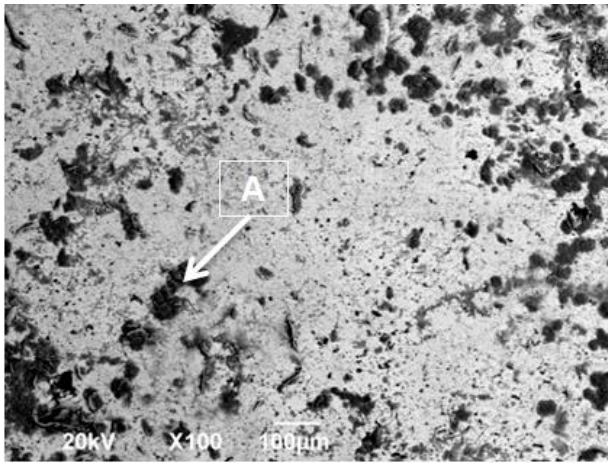


Figura 2 Figura 25 Micrografías SEM a 100X de bujes de referencia MVM500.

Las regiones con tonos más oscuros en las micrografías representan zonas donde se encuentran los poros (A); estos se identifican mediante la escala de grises, que varía su tonalidad de acuerdo al peso atómico, las tonalidad claras representan elementos de mayor peso atómico(B). En la micrografía se identifican constituyentes deformados, diferentes a las partículas de los polvos sin compactar.

Para las muestras de referencia CT1000 y MVM1000 de igual manera se tomaron micrografías a 100 aumentos, y son evidenciadas en las figuras 3 y 4, en donde se observan geometrías irregulares, conformadas por las partículas de los polvos metálicos deformadas después del prensado y reprensado. A través de la escala de grises, se puede observar que el estaño (B- elemento de mayor peso atomico en la mezcla) no se presenta uniforme en la microestructura de ambos materiales, además se presenta gran porosidad a lo largo de las muestras (A).

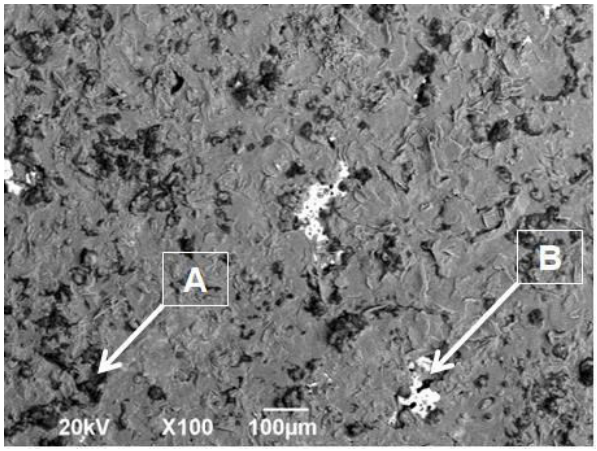


Figura 3 Micrografías SEM a 100X de bujes de referencia CT1000.

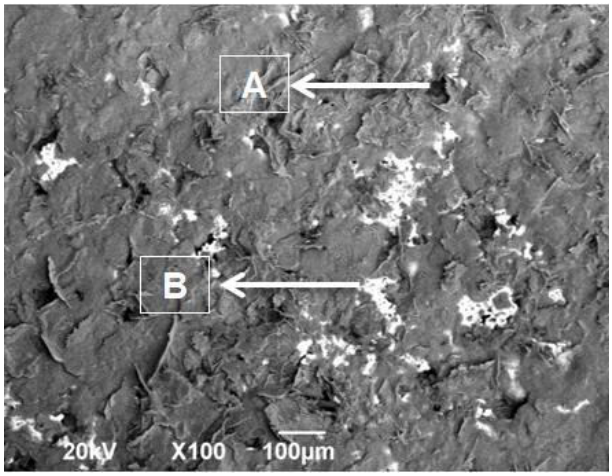


Figura 4 Micrografías SEM a 100X de bujes de referencia MVM1000.

Finalmente en la figura 5 la micrografía para la muestra MVM300 a 100 aumentos, revela una estructura más compacta, los poros que hay en la estructura(A), son de menor tamaño que las otras muestras. Presencia de porosidad bien distribuida. También se pueden observar microgrietas (B) en diferentes sectores del material, posiblemente generadas en el proceso del reprensado, lo que significa fragilidad en la estructura de este material.

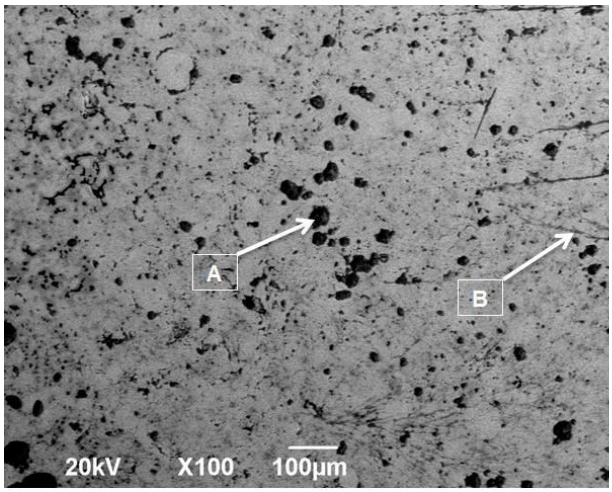


Figura 5 Micrografías SEM a 100X de bujes de referencia MVM300.

Análisis Térmico

A partir de un termograma, la cuantificación de la pérdida o ganancia de masa para un cierto cambio puede hacerse mediante proyecciones horizontales sobre el eje de masa. El ensayo se realizó con y sin campo magnético, para observar la reacción del material en otros medios.

En el grafico 1 se presentan las curvas del análisis termogravimétrico (TGA) para la mezcla de polvos metálicos (92%Cu 8%Zn), aplicando campo magnético, y sin él. Por ser una aleación muy sensible a las condiciones del sinterizado ya que el cinc a temperaturas superiores a 850°C forma fase líquida y tiene tendencia a la evaporación y oxidación según Krivij[1] , es de gran importancia este ensayo. Alrededor de los 210°C hay una disminución de masa, la cual tiene su pico más alto a los 450°C, este porcentaje de pérdida de masa, se debe en gran medida al ligante utilizado en las mezclas, que es de naturaleza polimérica. A partir de los 450°C, se aumenta el porcentaje de masa debido a que el material se oxida por calor.

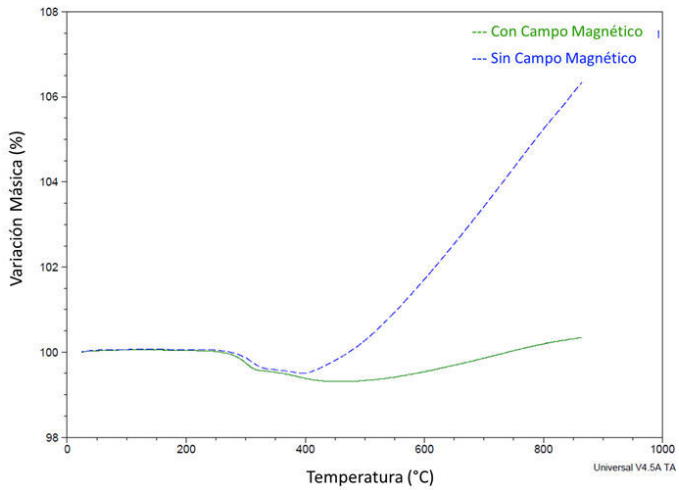


Gráfico 1 Termograma de la mezcla 92%Cu 8%Zn.

En la curvas, se observa un pico alrededor de los 300°C, debido a la descomposición del estearato de zinc, el cual es usado como ligante en la mezcla. Seguido a este, hay un pico a los 400°C, debido a la oxidación del metal. Ambas muestra se

comportaron de forma similar hasta una temperatura aproximada de 400°C, pero el ensayo realizado sin campo magnético, tuvo una ganancia de masa mucho mayor.

En el grafico 2 se obseva el termograma de la mezcla 90% Cobre y 10% Estaño aplicandole campo magnetico a horno, y sin el. Al comparar la variación de porcentaje másico de ambos ensayos, se tiene que a la muestra que se le aplico campo magnético, tuvo mayor ganancia másica, que el ensayo realizado sin campo magnético tal y como lo representa el grafico 2.

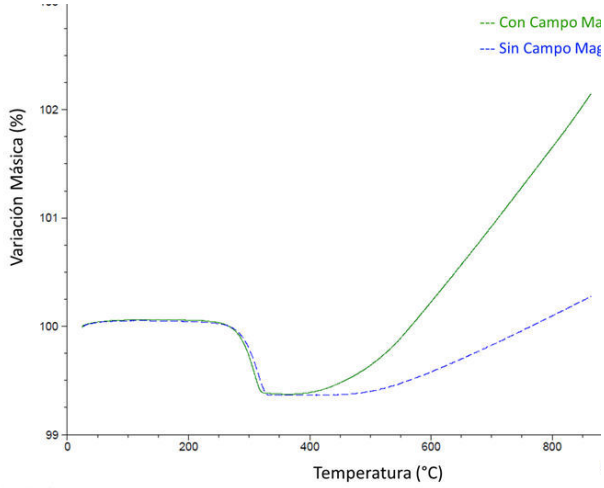


Gráfico 2 Termograma de la mezcla 90%Cu 10%Sn.

Finalmente el termograma para la mezcla Termograma de la mezcla 95%Cu 5%Sn, es mostrado en el grafico 3. Al comparar el comportamiento de los dos ensayos, se tiene que al aplicar campo magnético el aumento del porcentaje de masa es mayor, tal y como lo muestra el grafico 11. Para esta mezcla, sucede lo contrario que en la mezcla 92%Cu 8%Zn, en donde el mayor aumento del porcentaje de masa, se presentó en el ensayo realizado con campo magnético

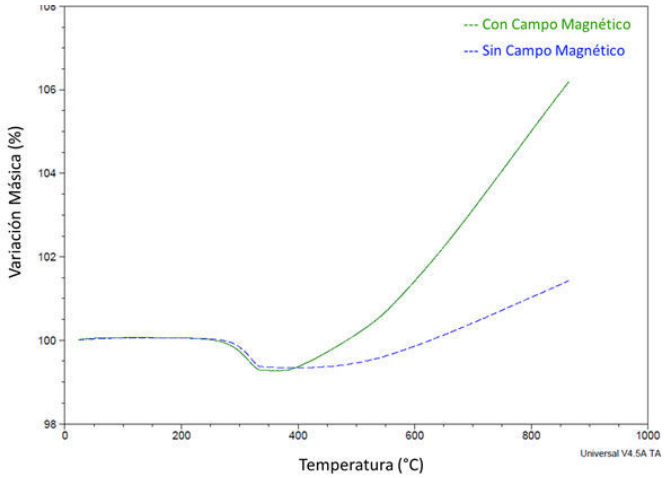


Gráfico 3 Termograma de la mezcla 95%Cu 5%Sn.

4. CONCLUSIONES

•Los bujes de referencia MVM500 y MVM1000 compiten directamente con las propiedades evaluadas de dureza, coeficiente de fricción dinámico y pérdida de masa por desgaste con los bujes comerciales de referencias CT500 y CT1000 respectivamente.

•Los bujes de cobre fabricados con 10% de estaño, presentaron mejores propiedades de dureza Vickers, coeficiente de fricción dinámico y tasa de desgaste por fricción que los bujes con 5% de estaño.

•La calidad de los bujes a introducir en el mercado, debe ser mayor o igual a la referencia de bujes comercial CT500. Los bujes de referencia MVM300 presentó valores de dureza menores, coeficiente de fricción dinámico mayor y tasa de desgaste mayor, por lo tanto esta referencia no puede ofrecerse al mercado, ya que sus propiedades evaluadas no cumplen con los

estándares de calidad de las referencias comerciales.

•Los bujes fabricados con adicción de estaño, presentaron mayores valores para la dureza Vickers, menores valores para el coeficiente de fricción dinámico y tasa de desgaste, comparados con los bujes fabricados con adición de Zinc.

•Los bujes de referencia MVM300 presentaron gran cantidad de microgrietas a lo largo de su estructura lo cual puede inducir a falla temprana en el material, debido a los concentradores de esfuerzo producidos por estas microgrietas.

REFERENCIAS

[1] Rodríguez A., 2015. Análisis de propiedades mecánicas y tribológicas de la aleación pulvimetalúrgica de bronce. Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.

[2] Krivij N, Suwardjo W y Cores A (1995), Optímización de los parámetros tecnológicos para la obtención de piezas de latón por pulvimetalurgia, Revista de Metalurgia, Vol. 31 N° 6, pp. 395-399.

Huanacuni, A. (2015). Estudio de las propiedades mecánicas de un compuesto de matriz metálica rico en 80% de cobre, aleado con zinc y estearato de zinc para evaluar la dureza y el desgaste vía la Pulvimetalúrgia. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa, Perú

Caldero Celis, J. (2010). Sinterización y estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la aleación $92Cu_8Zn_1Zn$ $(C_{10}H_{35}O_2)2$ para la fabricación de cojinetes auto lubricados. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima, Perú

Krivij, N. (2008). Obtención y caracterización del polvo de bronce Cu88Sn6,5Zn4Pb1,5 para aplicaciones en cojinetes. consejo superior de investigaciones científicas. Madrid, España

Consuelo Gobern, M. (2012). Técnicas de análisis y caracterización de Materiales.. Consejo superior de investigaciones científicas. Madrid, España. 2nd ed Pág. 56, 57

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA RPET (TEREFTALATO DE POLIETILENO RECICLADO) MODIFICADO CON REFUERZO DE GRAFENO.

MECÁNICA BEHAVIOR OF A POLYMER MATRIX COMPOSITE RPET (RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE) MODIFIED WITH GRAPHENE REINFORCEMENT

Rojas Omar F.* **Muñoz, Efren J.** **

* **Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,** Maestría en metalurgia y ciencia de los materiales, DANUM.
Avenida Central del Norte 39-115, Tunja, Boyacá, Colombia.
PBX (57+8) 7405626, 01 8000 942024
omar.rojas01@uptc.edu.co.

** **Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia**, DANUM.
Avenida Central del Norte 39-115, Tunja, Boyacá, Colombia
PBX (57+8) 7405626, 01 8000 942024
efren.muñoz@uptc.edu.co.

Resumen: El objeto de esta investigación se centra en el estudio de las propiedades mecánicas del plástico de las botellas de agua recicladas (RPET), este polímetro al ser recuperado pierde propiedades mecánicas causadas por el proceso de termoformado, razón por la cual no puede ser utilizado como material estructural, se toma como alternativa combinarlo con grafeno, cristal derivado de carbono que demuestra altas propiedades mecánicas, la metodología a utilizar consiste en caracterizar el material base (RPET), previamente construyendo una maquina extrusora para termo-formar las probetas para ensayos mecánicos, se combina el polímero reciclado con grafeno, proceso en seco, para ello el plástico debe estar como material particulado (polvo), para lograr este tamaño de grano, se diseña y construye una maquina pulverizadora, los dos se mezclan y homogenizan en la maquina extrusora para ser caracterizados y evaluados, se esperan obtener un aumento en el incremento de las propiedades mecánicas del composito polimérico.

Palabras clave: RPET, termo- formar, extrusión, grafeno.

Abstract: The object of this research is focused on the study of the mechanical properties of the plastic from recycled water bottles (RPET), when this polymer it's recovered it loses mechanical properties caused by the thermoformed process it goes through, which is why it cannot be used as a structural material, it is taken as an alternative to combine it with graphene, this as a carbon derivative has shown very high mechanical properties, the methodology to be used is to characterize the base material (RPET), previously building a extruding machine that allows thermoforming the test tubes for the different mechani-cal tests, followed to this combine the recycled polymer with graphene, process that has to be made in dry, for it the plastic must be a particulate material (dust), to achieve this size of grain, a pulverizing machine it's designed and built, having the two materials with similar grain size they are mixed and homogenized in the extruding machine to be characterized and evaluated, It is expected to obtain optimal results in the increase of the mechanical properties of the RPET.

Keywords: RPET, thermoform, extrusion, graphene.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación por materiales plásticos es un problema que se ha venido trabajando de diferentes formas, implementando sistemas, como reducir, reutilizar y reciclar, pero aún no se ha establecido un mecanismo y/o proceso que permita incorporar los envases post-consumo de bebidas como materia prima para nuevos usos (Castells, 2012; Manuel, 2011; Valdés & Cano-Santana, 2005).

Una parte fundamental de este estudio se basa en el reciclado de botellas de agua mineral, fabricadas a partir de PET (Tereftalato de polietileno), El PET está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire.

Este polímetro al ser recuperado pierde propiedades mecánicas causadas por el proceso de termoformado, razón por la cual no puede ser utilizado para fabricación de piezas que requieran ser sometidas a esfuerzos, actualmente alrededor del 75% del RPET (PET reciclado, por sus siglas en inglés) es recuperado para ser utilizado como fibra de alfombras, ropa polar, cuerdas y algunos accesorios (Mansilla-Pérez & Ruiz-Ruiz, 2009).

En este proyecto se presenta como alternativa combinarlo con grafeno, éste cristal derivado de carbono por tener los átomos dispuestos en un plano de forma hexagonal, presenta altas propiedades mecánicas y su alta porosidad permite mezclarlo con el RPET de una forma más sencilla que otros materiales que también puedan presentar buenas propiedades mecánicas (Rodríguez & López, 2014).

La metodología a utilizar consiste en obtener un material con partículas que permitan mezclarlo con el grafeno, para ello, los envases plásticos son sometidos a un proceso de reducción (pulverizado), para este proceso se diseña y construye una máquina provista de un disco labrado, el cual al rozar con las botellas plásticas, por fricción, permite obtener tamaños de material hasta de 75µm.

Para mezclar y termo-formar el RPET y grafeno se construye una maquina extrusora mono husillo, que permite utilizar la cámara como herramienta de homogeneización del compuesto en porcentajes de 1%, 3% y 5% en peso de grafeno, proceso mecánico llevado en frio, paso seguido se funden las probetas de los diferentes sistemas para realizarles los ensayos mecánicos.

Se esperan obtener un incremento de las propiedades mecánicas del RPET permitiendo utilizar el producto en procesos industriales como la construcción de módulos de ensamble en prototipos de calentadores solares fabricados a partir de material reciclado.

2. METODO EXERIMENTAL

2.1 Materiales

Polietileno Tereftalato Reciclado (RPET): el PET fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J. T. Dickinson en 1941. Catorce años más tarde, en 1951 comenzó la producción comercial de fibra de poliéster (Ravindranath & Mashelkar, 1986).

Tipos de PET: Además de su clasificación como plástico, existen tipos de PET que se obtienen a partir de su fórmula básica como el APET que significa que es un PET amorfo, el CPET que es el PET cristalino y el RPET se designa al material reciclado. En este último tipo, pueden existir dos formas como el PET post industrial, que son los residuos que se obtienen en el proceso de reutilización del PET y el PET post-consumo (Ver Fig. 1) que se refiere principalmente a las botellas plásticas de PET que se desechan y son recicladas (Kawakami et al., 2004).



Fig. 1 Botellas post-consumo

Grafeno: es una sustancia compuesta por carbono puro, con átomos dispuestos en patrón regular hexagonal, similar al grafito, pero en una hoja de un átomo 100 veces más fuerte que el acero. Su densidad es aproximadamente la misma que la de la fibra de carbono, y es aproximadamente 5 veces más ligero que el aluminio. Una lámina de 1 metro cuadrado pesa tan solo 0,77 miligramos.(Kawakami et al., 2004) (Ver Fig.2).

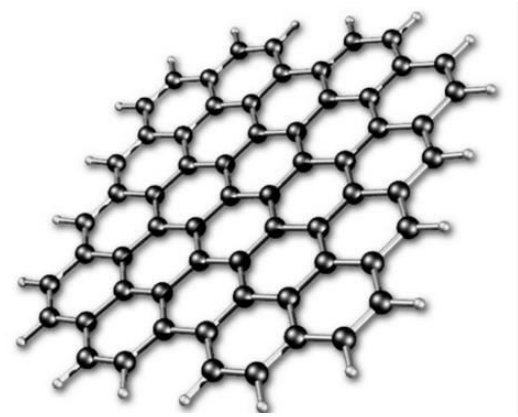


Fig. 2 Estructura del grafeno

2.2 Preparación y moldo de los sistemas

La investigación parte del diseño y construcción de una máquina pulverizadora y una extrusora de plásticos.

El proceso de pulverización del material base (RPET) se realiza con material reciclado (envases plásticos de agua mineralizada). El material es sometido a esfuerzos de desgaste mediante un disco labrado fabricado en acero inoxidable movido por un motor de 1HP a 826 RPM.

El material pulverizado se pasa por tamices #16, #100 y #200 hasta obtener tamaños de grano de 75µm, morfología necesaria para facilitar una mezcla homogénea con el grafeno.

El RPET es sometido a un proceso de extrusión en una máquina extrusora mono husillo, con los siguientes parámetros:
Cámara: 150°C,
Husillo: 70°C
RPM husillo: 160
Molde: 60°C

El moldeo se realiza en una matriz con dimensiones estandarizadas según normas ASTM D638-01. (Ver Fig. 3)

Inicialmente se preparan varias probetas solamente de RPET según las normas indicadas en el ítem previo. De esta manera, se dispondrán las probetas necesarias para los ensayos posteriores y además se sabrá la cantidad de RPET requerida para la preparación de una probeta. Así determinar la cantidad de grafeno se va a requerir para las probetas compuestas.

El material de la matriz polimérica de RPET se mezcla en seco con el refuerzo de Grafeno en porcentajes de 1%, 3% y 5% en peso, proceso que se realiza pasándolo mínimo 3 veces por la cámara de la extrusora a 160 RPM del husillo a temperatura ambiente, hasta tener una mezcla lo más homogénea posible. Éstas son las probetas compuestas. (Ver Fig. 4)

El compuesto es extruido y moldeado bajo las mismas condiciones del RPET.

2.3 Caracterización cualitativa

El material obtenido del proceso de pulverización y tamizado (MATRIZ RPET) se analiza mediante Microscopia Electrónica de barrido (MEB) para determinar la morfología del grano y Análisis calorimetría de barrido diferencial DSC (siglas en inglés, Differential Scanning Calorimetry) para determinar las transiciones endotérmicas y exotérmicas del material y establecer la

temperatura de transición vítrea del polímero, temperatura necesaria para el proceso de extrusión.

El refuerzo (Grafeno) se analiza mediante ensayos de espectroscopia infrarroja y como complemento con espectroscopia Raman para analizar la composición química y ratificarlo con la ficha técnica del proveedor.

Las probetas obtenidas según norma ASTM D638-01, se someten a ensayos de tracción, para así determinar los parámetros numéricos que caracterizan el comportamiento mecánico del material base y del compuesto.

El Análisis de fracturas mecánica de los diferentes sistemas de mezclas, se estudia con el apoyo de Microscopia electrónica de barrido MEB.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

Caracterización cualitativa RPET, grafeno

El material obtenido en el proceso de pulverización difiere de tamaños, Puede observarse granza de RPET con forma irregular que oscila entre 71,64 µm a 19,81 µm de ancho y 339,6 µm a 261,2 de longitud, entre otros. (Ver Fig. 3).

Aparenta un una superficie envolvente derivada del proceso al que es sometido, en el cual el polímero se desprende en partículas gracias a la fricción ocasionada por el disco labrado con el cual entra en contacto.

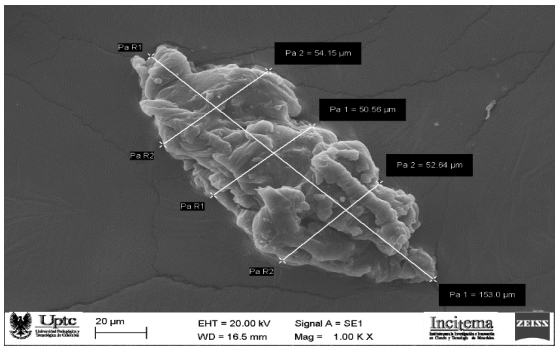


Fig. 3 Estructura del grafeno

Los resultados de MEB arrojan una composición de Carbono 74,79% y Oxigeno 25.21% (Ver Tabla 1)

Tabla 1Composición RPET

Elemento	Peso %	Peso% sigma	% Atomico
C K	69.02	2.67	74.79
O K	30.98	2.67	24.21
Total	100		100

La grafica obtenida por DSC (Ver Fig. 4) representa la curva de flujo calorífico versus temperatura (Wang, Gao, Ma, & Agarwal, 2006), la muestra exhibe reacciones exotérmicas como picos positivos, una de temperatura de transición vítrea a 247.28° , temperatura de cristalización 402.83° y temperatura de fusión 423.64°

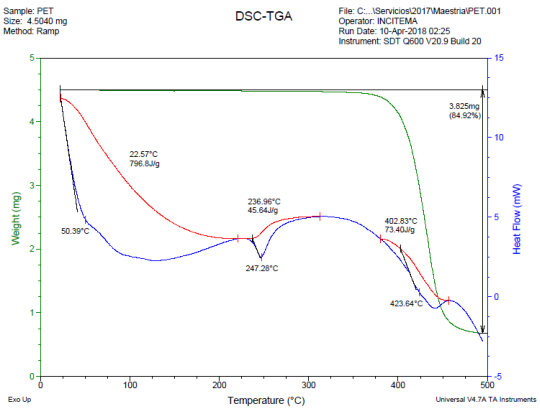


Fig. 4 Temperatura de transición vítrea de RPET

En el espectro de infrarrojo (Ver Fig. 5) se observa una serie de bandas de absorción mínimos de transición o transmitancia (Ni et al., 2008)

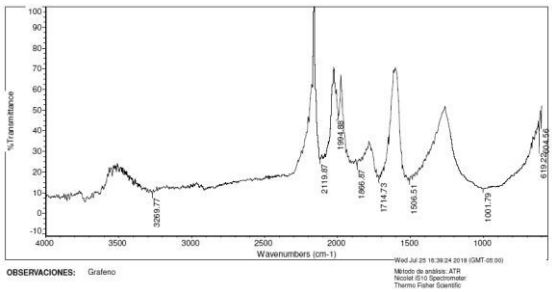


Fig. Fig. 5 análisis y caracterización por Espectroscopia infrarroja (Espectroscopia IR)

La tabla 2 muesta la bandas caracteristicas del tipo de estructura.

Tabla 2: Bandas

Freuencia	Enlace	Tipo de vibracion
1001.79	C-N	Tension
1506.51	N-H	Flexion
1714.73	O-H	Flexion
1866.87	O-H	Flexion
2119.87	C-N	Tension
3269.77	O-H	Tension

En el espectro Raman (Ver Fig. 6) de las muestras de grafeno concuerdan con los resultados obtenidos por IR

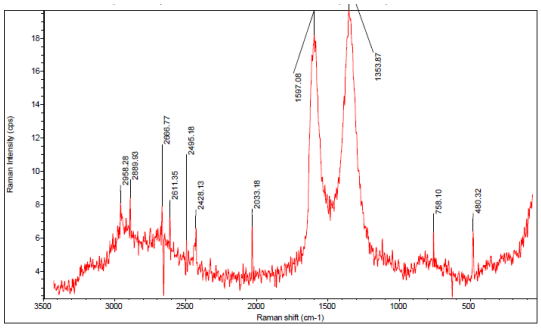


Fig. 6 Análisis y caracterización de grafeno mediante técnicas espectroscópica Raman.

Caracterización Mecánica

Inspección visual de las muestras:
Se presentan a modo comparativo las probetas fundidas, (Ver Fig. 7 y 8) la apariencia de las probetas tipo halterio de RPET y Mezcla de RPET/grafeno 0.3% en peso. De las cuales se pueden aducir las siguientes observaciones:

Las probetas de RPET exhiben un color beige homogéneo, superficie lisa, sin poros o grietas, dimensiones dentro de los rangos normales exigidos por la norma.

La adición de contenido de grafeno, promueve un cambio óptico de color claro a negro mate, homogéneo en la superficie.

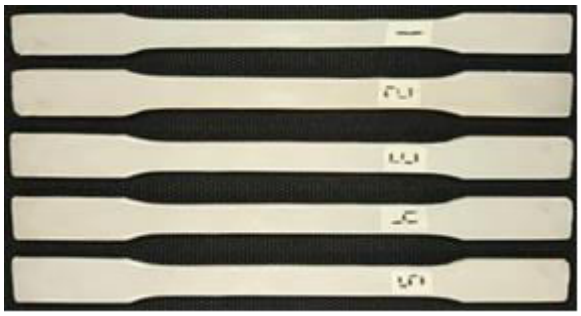


Fig. 7 Probetas RPET, dimensiones Norma ASTM D638-01



Fig. 8 Probetas RPET/GRAFENO 3% en peso Norma ASTM D638-01

En la grafico Fuerza desplazamiento (Ver Fig. 9) se observa que El RPET extruido presenta una tensión a la rotura de 17,636 Mpa y un límite elástico de 15,639 con una fuerza máxima de 1,14 kN. (Groover, de la Peña Gómez, & Sarmiento, 1997)

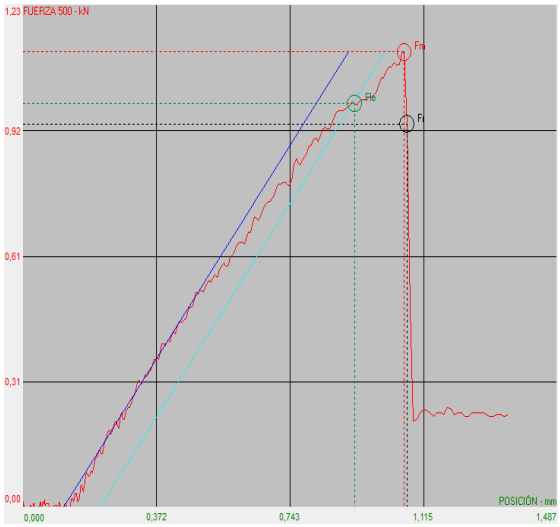


Fig. 9 Diagrama Esfuerzo – deformación RPET

Los resultados de las muestras de RPET/ grafeno 01%, 03%, 5% se encuentran en elaboración, se espera obtener un incremento en los parámetros numéricos que caracterizan al comportamiento mecánico del polímero.

Las características fractograficas serán evaluadas a partir de resultados obtenidos en ensayos de MEB

4. CONCLUSIONES

La morfología y tamaño de granza permite una mezcla e incorporación homogénea entre la matriz polimérica y refuerzo de grafeno, dando como resultado fluidez constante y homogénea dentro de la cámara de la extrusora.

Se espera que con la inclusión de nano-partículas de grafeno, se promueva un aumento de la resistencia mecánica (rigidez y tensión) y de tenacidad (energía para la ruptura).

Se espera que las características morfológicas del refuerzo operen de forma dispersa y no registren aglomeraciones que generen concentradores de esfuerzos actuando como impurezas intensificando tensiones, restringiendo el flujo plástico del sistema.

RECONOCIMIENTO

Grupo DANUM Desarrollo y aplicaciones de nuevos materiales UPTC.
Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA UPTC.
Grupo de investigación en nuevos materiales nano y supramoleculares, del departamento de Química de la universidad Nacional de Colombia.
Grupo de investigación REM ((Research on Energy and Materials) de la Universidad Antonio Nariño.
.

REFERENCIAS

Castells, X. E. (2012). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos solidos urbanos y fangos de depuradora*: Editorial Díaz de Santos, S.A.

Groover, M. P., de la Peña Gómez, C. M., & Sarmiento, M. Á. M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*: Pearson Educación.

Kawakami, D., Hsiao, B. S., Ran, S., Burger, C., Fu, B., Sics, I., . . . Kikutani, T. (2004). Structural formation of amorphous poly(ethylene terephthalate) during uniaxial deformation above glass temperature. *Polymer, 45*(3), 905-918. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.11.027

Mansilla-Pérez, L., & Ruiz-Ruiz, M. (2009). Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster. *2009*(027), 15. doi: 10.26439/ing.ind2009.n027.627

Manuel, V. (2011). *Los caminos del reciclaje*: Ned ediciones.

Ni, Z. H., Yu, T., Lu, Y. H., Wang, Y. Y., Feng, Y. P., & Shen, Z. X. (2008). Uniaxial Strain on Graphene: Raman Spectroscopy Study and Band-Gap Opening. *ACS Nano, 2*(11), 2301-2305. doi: 10.1021/nn800459e

Ravindranath, K., & Mashelkar, R. A. (1986). Polyethylene terephthalate—I. Chemistry, thermodynamics and transport properties. *Chemical Engineering Science, 41*(9), 2197-2214. doi: https://doi.org/10.1016/0009-2509(86)85070-9

Rodríguez, C. B., & López, R. M. M. (2014). *El grafeno*: Los Libros de la Catarata.

Valdés, T. V., & Cano-Santana, Z. (2005). *Ecología y medio ambiente*: Pearson Educación.

Wang, Y., Gao, J., Ma, Y., & Agarwal, U. S. (2006). Study on mechanical properties, thermal stability and crystallization behavior of PET/MMT nanocomposites. *Composites Part B: Engineering, 37*(6), 399-407. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.02.014

EFECTO DE LA VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN EN IMPRESIONES 3D SOBRE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL POLIACIDO LACTICO

EFFECT OF THE DEPOSITION SPEED IN 3D PRINTING, ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE LACTIC POLYACID

Holger Cacua, César Peña C., Bladimir Ramón Valencia

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial.
Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
+57 75685303
E-mail: {holger.cacua, cesarapc, hbladimir}@unipamplona.edu.co.

Resumen: la manufactura aditiva es una técnica en la cual se deposita el material capa por capa hasta obtener una pieza tridimensional con geometrías complejas en tiempos relativamente cortos y a bajo costo. Sin embargo, las propiedades mecánicas de las piezas se ven afectadas por los diferentes parámetros de fabricación como altura de capa, velocidad de impresión, temperatura de extrusión, entre otros, tanto así, que los fabricantes de filamentos recomiendan la configuración de parámetros más adecuada para obtener la mayor resistencia en las piezas. En este artículo se presentan los resultados experimentales de las propiedades mecánicas a tracción de probetas normalizadas fabricadas a partir de un polímero biodegradable de poliácido láctico. Se evaluaron configuraciones obtenidas a diferentes velocidades de extrusión: 20 mm/s, 36 mm/s, 60 mm/s y 90 mm/s, mediante la técnica del modelado por deposición fundida o 3D. De acuerdo a los valores obtenidos se observó que aumentando en un 50% la velocidad de impresión el tiempo de fabricación disminuye 4,9 horas y la resistencia a la tracción de las probetas solo se ve afecta en el 4%. Por tanto, se logra concluir que al incrementar la velocidad de los hilos extruidos por la técnica de impresión en 3D, se disminuyen los tiempos de fabricación sin afectar considerablemente las propiedades mecánicas.

Palabras clave: Velocidad de deposición, Propiedades mecánicas a tracción, Impresión 3D.

Abstract: The additive manufacturing is a technique in which the material is deposited layer by layer to obtain a three-dimensional piece with complex geometries in relatively short times and at low cost. However, the mechanical properties of the pieces were affected by the different manufacturing parameters such as layer height, printing speed, extrusion temperature, among others, so much so that filament manufacturers recommend the most appropriate parameter configuration for obtain the greatest resistance in the pieces. In this paper we present the experimental results of the tensile mechanical properties of standardized test pieces made from a biodegradable polyacid lactic polymer. Configurations obtained at different extrusion speeds were evaluated: 20 mm / s, 36 mm / s, 60 mm / s and 90 mm / s, by means of the molten deposition or 3D modeling technique. According to the values obtained, it was observed that by increasing the printing speed by 50%, the manufacturing time decreases by 4.9 hours and the tensile strength of the specimens is only affected by 4%. Therefore, it is possible to conclude that by increasing the speed of the extruded threads by the 3D printing technique, the manufacturing times are reduced without considerably affecting the mechanical properties

Keywords: Deposition speed, tensile mechanical properties, 3D printing

1. INTRODUCCIÓN

El modelado por deposición fundida (FDM) es una técnica de fabricación aditiva, en la cual la materia prima es un filamento polimérico, este es arrastrado por engranajes a través de un elemento denominado *hot-end*. Posteriormente, el material es sometido a una temperatura tal, que pasa del estado sólido al estado viscoso, y en consecuencia es extruido para dar origen a una pieza tridimensional (Arbeiter, Spoerk, Wiener, Gosch, & Pinter, 2018).

Esta técnica por FDM, permite fundir el material capa por capa, hasta formar un objeto con geometrías complejas y a menor costo. Con el paso de los años, el FDM ha sido de gran interés por diferentes sectores industriales, debido al impacto en la cadena de suministro al disminuir los tiempos de producción, eliminar costos de transporte, tiempos de espera, entre otros. (Kayfi, Ragab, & Tutunji, 2015).

Una desventaja de este método de FDM, es la baja resistencia mecánica y anisotropía de las piezas. Dizon, Espera, Chen, & Advincula, 2018, demostró que la resistencia depende de la dirección de deposición de los hilos. En otro estudio, (Cacua, Peña, & Ramon, 2018) analizaron los efectos de variar el ángulo de inclinación en ejes cilíndricos.

Otros trabajos relacionados en el área de estudio, evaluaron el efecto de los parámetros de impresión en las propiedades mecánicas y posteriormente determinaron, el tipo de patrón y densidad con el cual las piezas ofrecen mejor comportamiento a diferentes fuerzas de aplicación, (Fernandez-Vicente, Calle, Ferrandiz, & Conejero, 2016), (Croccolo, De Agostinis, & Olmi, 2013).

Por su gran versatilidad, esta técnica por FDM ha permitido avances importantes en diferentes áreas de la investigación. En el sector salud, se utilizó para la fabricación de prótesis (Borjas & Flores, 2016), mientras que en el campo de la biología se utilizó para obtener cráneos de roedores, para ser utilizados en prácticas de instalación de dispositivos intra craneales (Pohl, Gasca, Christ, & Hofmann, 2013). En esta misma disciplina, se construyó por impresión en 3D, un dispositivo que permite registrar la actividad neuronal de los peces (Rogers, Van Wert, & Mensinger, 2017). En ingeniería el FDM se ha utilizado para la fabricación de partes de máquinas, incluso de partes para la elaboración de otras impresoras (Kun, 2016), (Acuna, Rivas, Chancusi, & Navarrete, 2015), (Rodriguez, Cortés, & Peña, 2016). Por otro lado, se ha investigado el uso de esta técnica en la industria alimenticia (Lanaro et al., 2017).

Para lograr mayor resistencia en las piezas, los fabricantes recomiendan una velocidad y temperatura de extrusión. En el caso del poliácido láctico (PLA), es de 60mm/s y temperatura de 205°C. Un estudio desarrollado por (Song et al., 2017) demostró que con velocidades mayores 60mm/s, se generan poros internos en las piezas y en consecuencia hay una reducción de su resistencia.

La presente investigación tiene como finalidad determinar el efecto de la velocidad de deposición de los filamentos, en las propiedades mecánicas de probetas normalizadas de un plástico denominado poliácido láctico o PLA. De acuerdo con los resultados se concluye que es posible disminuir los tiempos de fabricación de una pieza por esta técnica, sin afectar de manera considerable el comportamiento a tracción de la misma.

2. MATERIALES Y METODOS.

2.1 Materiales

Para esta investigación el material utilizado es el poliácido láctico o PLA. Este polímero hace parte de la familia de poliéster y se obtiene a partir de recursos renovables como el maíz, la yuca y la caña de azúcar. Cuando se mezcla con polímeros naturales permite desarrollar materiales con mejores propiedades y resistencia al agua (Blanco, 2015). Una de las ventajas más relevantes del PLA es el grado de biocompatibilidad con los tejidos del cuerpo humano (AlberArraiza, 2008) .

El PLA es un polímero versátil que tiene muchas aplicaciones, incluyéndose en la industria textil, en la industria médica y sobretodo en la del empaquetado. Dentro de la industria textil, son conocidas las aplicaciones del PLA para la creación de telas empleadas en la tapicería, la elaboración de trapos y la confección de toldos y cubiertas resistentes a la luz U.V

Las propiedades del PLA según el fabricante *Ultimaker* se observan en la (tabla 1).

Tabla 1. Propiedades mecánicas del PLA

Propiedades mecánicas del PLA		
Módulo de elasticidad	3,3-3,6	GPa
Límite de elasticidad	55-72	MPa
Fuerza de tensión	47-70	MPa
Elongación	2,5-6	% tensión
Módulo de compresión	3,3-3,5	GPa
Fuerza de compresión	66-86,4	MPa
Fuerza de flexión	85	MPa
Módulo de flexión	3,1-3,6	GPa
Módulo de cortante	5,7-6,3	GPa
Hardness-vickers	17-22	HV

Para que las piezas obtengan las mejores propiedades mecánicas los fabricantes recomiendan utilizar los parámetros de impresión que se observan en la (tabla 2).

Tabla 2. parámetros de impresión recomendados por el fabricante de PLA

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de extrusión	205	°C
Temperatura de la cama caliente	70	°C
Altura de capa	0,2	Mm
Perímetros internos	7	UNI
Perímetros externos	15	UNI
Tipo de patrón	Rectilinear 45°	
Densidad	100	%
Velocidad de impresión	60	mm/s

2.2 Fabricación de probetas

Las probetas se fabricaron mediante el método de modelado por deposición fundida (FDM), haciendo uso de una impresora de código abierto Prusa Hephestos, a la cual se le realizaron modificaciones tanto estructurales como electrónicas

En la (tabla 3) se especifican las condiciones de impresión que utiliza la máquina de modelado por deposición fundida.

Tabla 3. Especificaciones de la impresora 3D

Especificaciones de la impresora 3D	
Velocidad e impresión	100 mm/s
Volumen de las piezas	215mm(X) x 210mm(Y) x 180mm(z)
Resolución	Alta 60 micras, Media 200 micras, Baja 100 micra
Material recomendado	Filamento PLA 1.75 mm
Boquilla del extrusor	0.4 mm
Disipador extrusor	Aletas con ventilador axial

Dentro de las características más llamativas de la impresora 3D, se puede observar (figura 1) el uso de una estructura metálica unida mediante juntas permanentes con soldadura 6013, con la cual se logra mayor rigidez y se espera mejorar la velocidad de fabricación.

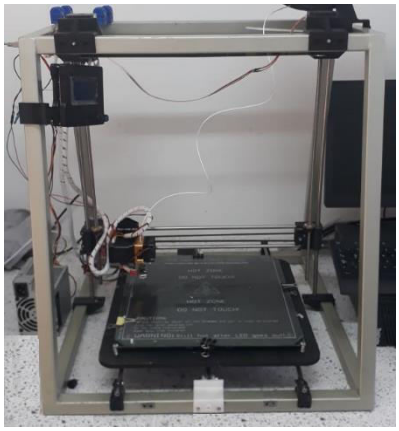


Fig. 1. impresora de código abierto Prusa Hephestos

2.3 Ensayos de tracción.

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina universal, Shimatzu de 600KN siguiendo los estándares de la norma ASTMA 638-10. La geometría de la probeta corresponde a una mancuerna y en algunos casos la referencian como hueso de perro. En la (figura 2) se observa la probeta utilizada en los ensayos de tracción.

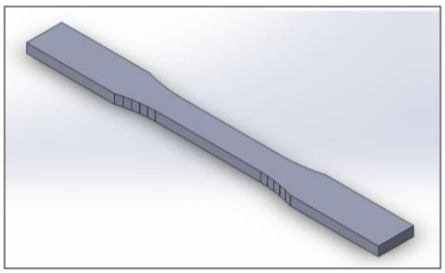


Fig. 2. Probeta tipo mancuerna para ensayos de tracción.

De igual forma, en la norma se establece las dimensiones de la probeta, para este caso se utilizaron las medidas que se observan en la (tabla 4), en donde se especifican la longitud calibrada y el espesor. Las otras dimensiones, la norma permite hacer modificaciones, que permiten adaptar la máquina para hacer el ensayo.

Tabla 4. Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción según norma 638-10

MUESTRAS PARA ENSAYOS DE TRACCION	
DIMENSION	**Medida en (mm)**
Anchura W de sección estrecha.	13
L-Longitud de la sección estrecha	57
Anchura total WO.	19
LO-longitud total.	165
G-longitud calibrada	50
D-distancia entre las empuñaduras	115
R-Radio del filete	76

3. RESULTADOS

En la (tabla 5) se pueden apreciar los resultados de los ensayos de tracción realizados para las diferentes configuraciones, variando la velocidad de extrusión entre los sistemas estudiados.

Se puede observar que la velocidad más baja de 20 mm/s se obtiene mayor resistencia a la tracción, esto se debe a que al aumentar la velocidad aumenta la vibración de la impresora, lo que en consecuencia puede conllevar a la formación de poros ocasionando que disminuya la adherencia entre las capas.

Tabla 5. Resultados ensayos de tracción.

Velocidad (mm/s)	Módulo (Gpa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Deformación (%)	Tiempo de fabricación (Horas)
20	0,15	57,7	16,8	6
36	0,21	55,3	14,8	3
60	0,19	53,4	15,6	1,5
90	0,2	51,3	14,6	1,1

El análisis de estos resultados demuestra que para el caso de la probeta fabricada con una velocidad de 90mm/s hay perdida en resistencia a la tracción de 6,4 MPa con respecto a la probeta fabricada con velocidad de 20 mm/s, pero se debe resaltar que la diferencia entre los tiempos de fabricación es bastante significaba puesto que con la velocidad de 20 mm/s el tiempo de fabricación por probeta es de 6 horas mientras que con la velocidad de 90 mm/s el tiempo es de 1,1 hora, es decir se logra un ahorro en el tiempo de fabricación 4,9 horas.

Se atribuye este logro a la rigidez estructural de la impresora 3D utilizada, puesto que fue fabricada con tubos metálicos unidos mediante juntas soldadas, las cuales no sufren desajuste por la vibración causada durante el funcionamiento, permitiendo utilizar velocidades de impresión más altas, en consecuencia, se logra fabricar piezas en tiempos menores sin afectar en gran medida su resistencia.

Con respecto a los valores arrojados con el porcentaje deformación, es evidente que el material disminuye la ductilidad en la medida que se incrementa la velocidad de deposición. Este fenómeno se puede analizar a partir de la pobre adhesión entre los filamentos al solidificarse, con lo cual se limitada sus fuerzas de unión entre las capas. Además, es posible la formación de concentradores de esfuerzos por el origen de poros internos al acelerar el proceso de deposición.

Es importante realizar un análisis de microscopia electrónica de barrido, que permita validar las hipótesis anteriormente mencionadas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los experimentos planteados permiten determinar que es posible aumentar la velocidad de impresión al emplear filamento de PLA de 1.75mm a una temperatura de 205ºC cuando se emplean estructuras robustas que disminuyen las vibraciones en las impresoras.

Para un aumento del 50% de la velocidad recomendada inicialmente por el fabricante, se detectó tan solo una disminución del 4% de la resistencia a la tracción, lo cual es un logro significativo teniendo en cuenta que esto puede repercutir de forma positiva en la disminución de los tiempos de los procesos de producción y a su vez disminuir el consumo energético empleado teniendo en cuenta el menor uso de la cama caliente.

5. REFERENCIAS

Acuna, F., Rivas, D., Chancusi, S., & Navarrete, P. (2015). Design and Construction of a 3D Printer Auto Controller Wirelessly Through of Free Software. *IEEE Latin America Transactions*, *13*(6), 1893–1898. https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7164214

Alberto Lopez Arraiza. (2008). Correlaciones procesado-estructura-porpiedades en sitemas polimericos complejos basados en poliesteres biodegradables. evaluación de su posible uso en aplicaciones ecológicas y biomedicas (tesis de doctorado). *Escuela Tecnica Superior de Ingenieria de Bilbao*. Retrieved from http://fondosdigitales.us.es/media/thesis/722/S_TD_203.pdf

Arbeiter, F., Spoerk, M., Wiener, J., Gosch, A., & Pinter, G. (2018). Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near- homogeneous components produced by fused fi lament fabrication. *ELSEVIER*, *66*(November 2017), 105–113. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.01.002

Borjas, R., & Flores, W. (2016). Developing a human prosthesis using a 3D printer in Honduras. *Proceedings of the 2015 IEEE 35th Central American and Panama*

Convention, CONCAPAN 2015, (Concapan Xxxv). https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2015.7428465

Cacua, H., Peña, C., & Ramon, B. (2018). Evaluation of the Mechanical Properties of Shafts Manufactured With 3D Printing for Different Inclinations of the Fused Deposition Layers. *Indian Journal of Science and Technology*, *11*(September), 1–7. https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i33/131106

Croccolo, D., De Agostinis, M., & Olmi, G. (2013). Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science*, *79*, 506–518. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041

Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, *20*, 44–67. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002

Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, *3*(3), 183–192. https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036

Kayfi, R., Ragab, D., & Tutunji, T. a. (2015). Mechatronic System Design Project : A 3D Printer Case Study Mechatronic System Design Project : A 3D Printer Case Study. In *IEEE jordan conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)* (pp. 1–6).

Kun, K. (2016). Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. *Procedia Engineering*, *149*(June), 203–211. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.657

Lanaro, M., Forrestal, D. P., Scheurer, S., Slinger, D. J., Liao, S., Powell, S. K., & Woodruff, M. A. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, *215*, 13–22. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029

Pohl, B. M., Gasca, F., Christ, O., & Hofmann, U. G. (2013). 3D printers may reduce animal numbers to train neuroengineering procedures. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER*, 887–890. https://doi.org/10.1109/NER.2013.6696077

Rodriguez, E., Cortés, E., & Peña, C. (2016). Application of the Qfd Methodology in the Development of. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Retrieved from Results for %22APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA QFD EN EL DESARROLLO DE UNA IMPRESORA 3D APPLICATION OF THE QFD METHODOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF A 3D PRINTER%22 in %22All Documents%22

Rogers, L. S., Van Wert, J. C., & Mensinger, A. F. (2017). An implantable two axis micromanipulator made with a 3D printer for recording neural activity in free-swimming fish. *Journal of Neuroscience Methods*, *288*, 29–33. https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2017.06.012

Song, Y., Li, Y., Song, W., Yee, K., Lee, K., & Tagarielli, V. L. (2017). Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA, *123*, 154–164. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051

Mejoramiento de los falsos rechazos generados por los inspectores de botella vacía por medio de un Control Estadístico de Procesos (CEP)

Improvement of the false rejections generated by the inspectors of empty bottles by means of a Statistical Process Control (SPC)

Martha Catalina Ospina Hernández [*], Albert Miyer Suarez Castrillon [**] , Elkin Gregorio Flórez Serrano[**], José Roberto Marín[*]

[*] **Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD),** Facultad de Ingenierías,
Programa de Ingeniería Industrial.
Dirección, Medellín, Antioquia, Colombia.
Teléfono y Fax, con indicativos internacional y nacional.
E-mail: {martha.ospina, ajmonto7029}@unad.edu.co.
[**] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenieria y Arquitectura, Grupo GIMUP. KM 1 via Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. +575685303
E-mail: {albertmiyer, eflorez}@unipamplona.edu.co.

Resumen: En el siguiente trabajo se desarrolla una propuesta para mejorar e implementar el plan de manejo actual de los inspectores de botella vacía en una cervecería de la ciudad de Medellín, identificando los puntos que afectan la productividad, y cómo se puede implementar un mantenimiento y manejo estandarizado de maquinaria centrado en confiabilidad, en este caso específicamente los inspectores de botella vacía. Para el desarrollo del trabajo, se utiliza el Control Estadístico de Procesos (CEP), además se analizan alternativas y se analiza el tipo de mantenimiento y manejo que es factible de implementarse en la empresa, tambien se realiza estudio sobre el funcionamiento de algunas líneas de producción que presenta mayor número de falsos rechazos de envase, en todas las áreas que afectan directa e indirectamente las líneas, las cuales son: El talento humano, el manejo de repuestos, el presupuesto, los procedimientos y la programación de mantenimiento determinando falencias y fortalezas del plan de mantenimiento utilizado actualmente.

Palabras clave: Normativa de publicación, procedimientos, publicación, formato IFAC.

Abstract: In the following work a proposal is developed to improve and implement the current management plan of the empty bottle inspectors in a brewery in the city of Medellín, identifying the points that affect productivity, and how standardized maintenance and management can be implemented of machinery focused on reliability, in this case specifically the empty bottle inspectors. For the development of the work, Statistical Process Control (CEP) is used, alternatives are analyzed and the type of maintenance and management that is feasible to be implemented in the company is analyzed, as well as a study on the operation of some lines of work. production that presents the highest number of false rejects of packaging, in all areas that directly and indirectly affect the lines, which are: Human talent, spare parts management, budget, procedures and maintenance schedule determining flaws and strengths of the maintenance plan currently used.

Keywords: empty container inspectors, SPC, failures.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de maquinaria industrial ha alcanzado un valor muy importante dado que la competencia se está desarrollando rápidamente en cuanto al uso de medios tecnológicos se refiere. Se llevan a cabo muchos esfuerzos para lograr los objetivos de incremento de la disponibilidad de los equipos y disminución de la tasa de fallos, objetivos que se deben obtener teniendo en cuenta el costo – beneficio del mantenimiento.

El mantenimiento tiene uno de los costos de operación más altos que deben ser vigilados en la industria, pero se debe ser consecuente al momento de evaluar el impacto comercial, volumen de producción, calidad de producción, costos operacionales, seguridad y riesgo ambiental tomando como referentes las bases de datos generadas de la empresa, se realiza un control estadístico de procesos (CEP) para medir y disminuir la cantidad de fallos presentados por los inspectores de botella vacía; este control permitirá hacer un análisis adecuado y organizado para poder ejecutar un estudio de eficiencias y afectaciones de los equipos en producción y sugerir el seguimiento del diagrama de toma de decisiones de los manuales de cada equipo. Dentro de este se enfoca el estudio de datos a los equipos más críticos, identificados como los inspectores de envase vacío que presentan el mayor número de eventos de falla y tiempos perdidos de producción, para mejorar la eficiencia mecánica de los mismos, esto a través de prácticas de producción estandarizadas.

2. ANTECEDENTES

La embotelladora en donde se llevó a cabo el estudio, como empresa organizada tiene sus propios parámetros de trabajo y de manejo de eficiencias en las líneas de producción, esto con el fin de mantener la inversión realizada, aumentar las ganancias y llenar las expectativas de los clientes.

De acuerdo con (García et al., 2003; Campos,2009) es importante establecer un sistema de gestión para la calidad que este claramente orientado a los procesos y a la mejora continua; Pues, las organizaciones lograrán el liderazgo en la medida que tengan la habilidad para mantener la excelencia de sus procesos y se comprometan con el constante desarrollo de sus objetivos, siempre orientados a la satisfacción de sus clientes.



Fig. 1 Inspectores de botella

Esta empresa manufacturera, es una empresa que forma parte de una multinacional que ha llegado a diferentes partes del mundo, por lo tanto, debe cumplir un estándar de calidad y de producción, por ello todas sus líneas de producción deben operar de manera que sobrepasen o mantengan estables los parámetros de eficiencia productiva y mecánica.

3. DIAGNÓSTICO INICIAL

El presente trabajo inicia con la recolección de información por medio de CEP, esto para realizar ajustes en los inspectores de botella, esta información ha sido extraída de manuales de las empresas que fabrican y comercializan las máquinas, del mismo modo que de las que prestan soporte técnico a nivel mundial, nacional y local.

Gran parte de la información fue recopilada durante capacitaciones recibidas en diferentes partes y de diferentes entidades y relacionadas a la interacción con los inspectores de botella vacía.

La inspección que se realiza a una botella se basa en los siguientes parámetros: base, pared interna, labio, pared externa y líquido residual, estas son las zonas que normalmente se inspeccionan a una botella de vidrio

En la siguiente imagen (figura 2) se muestran los porcentajes de rechazos tan altos que se tenían

antes de hacer las respectivas calibraciones y ajustes especialmente en la línea 750.



Fig. 2 Porcentajes de rechazo de la línea 750

Dicho lo anterior, para permanecer en el mercado, las empresas han tenido que desarrollar numerosos enfoques, y utilizar distintas herramientas, con el propósito de aumentar su productividad. Una de las herramientas que más comúnmente usan las empresas para lograr una alta productividad es la medición de sus procesos mediante indicadores de productividad y eficiencia. Es así como la intención de realizar una repotenciación de la desempacadora de botellas Remy está dirigida a mejorar dichos indicadores; esto dado que con ello se aumentará su productividad y eficiencia.

4. Desarrollo teórico

A. Control estadístico del proceso–CEP

Actualmente existen, una gran variedad de herramientas que pueden ser utilizadas para posibles mejorías y diagnósticos, pero una de las principales es el uso de técnicas estadísticas que viene a lo largo de los años, mejorando todo sistema operacional además de permitir tornar los productos fabricados más competitivos. Debido a eso, el investigar las causas de problemas y caminos para mejorías debe ser constante.

Dentro de esas herramientas, una muy utilizada es el Control Estadístico de Proceso (CEP) que es la rama de calidad que consiste en la recolección, análisis e interpretación de datos, establecimiento de calidades, comparación de desempeños, verificación de desvíos, todo eso para su utilización en las actividades de mejoría y control de calidad de productos, servicios y diagnóstico de defectos.

Además de obtener productos con mejor calidad, la utilización del CEP genera costos menores y eso disminuye principalmente en función de dos razones: la inspección por muestreo y la reducción de rechazo. Donde la selección de muestras es de tamaño mucho menor que la población, disminuyendo consecuentemente los costos y paradójicamente acaba representando mejor las características de la población, otra ventaja en la reducción de costos es que el número y porcentaje de piezas defectuosas producidas en la fábrica van a disminuir con las mejorías en la línea de producción (Campos,2009).

El CEP permite que las acciones correctivas sean aplicadas antes del surgimiento de inconformidades, responde a la pregunta si el proceso está funcionando como debía o si está fuera de las especificaciones de calidad y ejecuta acciones apropiadas para lograr y mantener un estado de control estadístico (Wheeler, D;2010)

La utilización de esa herramienta permite conocer el comportamiento del proceso y hacer previsiones sobre su desempeño, ese comportamiento es analizado a través de medidas a él asociadas teniendo en cuenta los conceptos de estabilidad y capacidad. Un proceso es considerado estable si el mismo es reproducible. La estabilidad permite prever el desempeño del proceso en ejecuciones futuras y elaboración de planes alcanzables. Según (Ribeiro, J;2003). la previsibilidad es la esencia del control estadístico. Por otro lado, un proceso solo puede ser llamado eficaz, si él es estable y cumple con todos los objetivos y metas de la empresa y del cliente. Con relación a la estabilidad, es importante destacar que todos los procesos sufren variaciones en su comportamiento. Siendo así, un proceso estable no es aquél que no presenta variaciones, sino que presenta variaciones aceptables dentro de límites previsibles, que caracterizan la repetitividad de su comportamiento (Campos, R;2003)

Es muy común en fábricas donde los procesos industriales no son optimizados en el sentido de ser caracterizados por altos niveles de eficiencia, sin embargo, dentro del CEP existen herramientas para monitorizar el proceso y, por tanto, mejorarlo. El

monitoreo tiene como requisitos el muestreo hecho periódicamente y tamaño de la muestra adecuado.

La principal ventaja proporcionada por esa herramienta es la realimentación del proceso en tiempo real, debiendo ser continua y estadísticamente fundamentada. Para mejorar la eficiencia de un servicio es necesario conocer con la situación en cada momento y especialmente en el caso en que se desea iniciar un proceso de transformación profundo.

B. *Fallas*

En los departamentos de mantenimiento industrial hay que tener bien definido el concepto de una falla, donde se debe entender o definir como toda alteración o interrupción en el cumplimiento de la función requerida; esta definición nos ayudan a revisar cómo se pueden originar y como clasificar las fallas de los equipos de la compañía. El origen de las fallas se puede presentar desde un mal diseño o error de cálculo

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. *Plan de implementación*

Teniendo en cuenta la disponibilidad de la empresa y los resultados del CEP y los estudios realizados se determina el siguiente modelo para el plan de implementación:

La primera etapa se compone de la capacitación del personal por departamentos, la temática a trabajar es unificar parámetros de trabajo y de lenguaje, no solo en el departamento de mantenimiento sino en producción también, así mismo la planta genera un lenguaje y una codificación de máquinas y de fallas organizada, permitiendo que las propuestas que se realicen para optimizar tiempos y procedimientos, den mayor resultado.

Inicialmente se busca generar interés por esta iniciativa, vendría una parte de teoría que sería básicamente para conocer las herramientas necesarias y como se deben usar, para que todos aporten a la consecución de información real y de valor, de todos los aspectos que se pueden mejorar en el funcionamiento del equipo de mantenimiento de maquinaria. Esta primera etapa debe tener una intensidad horaria que se puede acomodar a la disposición de la empresa.

También dentro de las capacitaciones se debe hacer consiente a todo el personal de la importancia y la responsabilidad que tiene cada uno en el momento de manejar datos y generar o modificar ordenes de trabajo, de servicio, solicitud de materiales, requisición de materiales, proyectos de mejora, etc.

En la segunda etapa se mejorara el uso de la documentación que ya se está manejando en la empresa como lo son las hojas de inspección y el cumplimiento real de los recorridos de inspección.

En la tercera etapa se generara la rotulación de los puntos de lubricación no solo de los equipos críticos sino en todas las máquinas y/o equipos de la línea de producción con la información no solo del lubricante que se le adiciona sino también la frecuencia y la fecha en que se le realizo la última intervención, así se genera menos paradas por falta de lubricación y extiende la vida útil de los engranajes en la línea de producción.

En la cuarta etapa se empezarán a terminar los trabajos por completo en los fines de semana, porque cuando se realiza una intervención los fines de semana se realizan las pruebas de seguridad, de funcionamiento y ajustes. De esta forma se busca disminuir trabajos correctivos en las horas de producción, que generan pérdida de tiempo, bajando las eficiencias en el arranque de la semana.

Adicionalmente a las etapas propuestas en el plan de implementación se sugiere tener en cuenta para las intervenciones de las fallas registradas en las máquinas.

B. Ajuste de los equipos

C. Los equipos fueron ajustados y evaluados día a día, en donde se observa una disminución importante de los fallos. Se hacen cálculos. Este análisis se realiza en compañía del Ingeniero de planta

D. En el salón de envase son 3 líneas de producción, pero el cálculo se hace solo con dos líneas, dado que la línea 750 se está alternando con la línea 5 o la línea 8, lo que

quiere decir que durante todo el año hay dos líneas de vidrio produciendo simultáneamente.

Tabla 1. Datos ajustados al inspector de botellas vacías

Promedio Turno botellas rechazadas (antes)	27.216
Promedio Turno botellas rechazadas (Después)	21.409
Diferencia	5.807
Promedio día	17.421
Costo de lavado de una botella en reproceso	87.105
Costo mensual	2.090.520
Costo anual por línea	25.086.240
Costo para dos líneas	50.172.480
Incremento de producción, Horas	0,241958333
Ahorros por eficiencia, día	411.329
Ahorros por eficiencia, mes	9.871.900
Ahorros por eficiencia, Año	118.462.800
Ahorro Total por linea	143.549.040
Ahorro Total por dos lineas	287.098.080

E. Se adjunta evidencia de los datos ajustados al inspector de botellas vacías de la línea 750 con el formato de Light, al igual que este formato se ajustaron para marrón 750 en este equipo, en la línea 5 se ajustaron los formatos de ámbar 225, costeñita, marrón 330, light 330, formato de Trophy y en la línea 8 marrón 330, light 330.

F. Una vez realizados los ajustes pertinentes a los equipos mencionados, se han alcanzado valores muy significativos como se muestra en la imagen 3, de 2,43%, esto siempre y cuando la botella no presente novedades, en términos de falsos rechazos. (Botellas que son rechazadas sin causa aparente sino por ajustes propios del inspector).

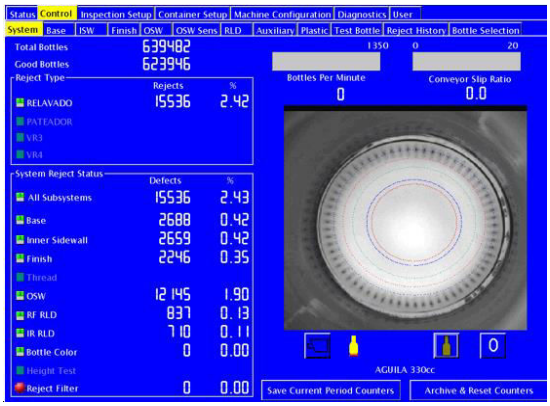


Fig. 3 Disminución de falsos rechazos

Para esta última etapa se ha socializado con los técnicos de línea la importancia de manejar unos buenos algoritmos de inspección, para esto se realizaron varias secciones de entrenamiento y capacitación como se muestra en las evidencias a continuación. Para soportar dichas capacitaciones se tiene el aval del ingeniero Diego Andrés Mejía que es el coordinador de mantenimiento de envase

Las capacitaciones fueron realizadas en distintos horarios dadas las circunstancias y los diferentes tiempos de disponibilidad de los técnicos, incluso desde los ajustes iniciales ya que fueron los de mayor beneficio dado que se pudieron apreciar los efectos.

Una vez realizadas las capacitaciones se han hecho acompañamientos a los técnicos para mejorar cada día el desempeño de los equipos, también se han dado tips en donde los técnicos identifican las posibles causas por las cuales no se logra una buena inspección, como por ejemplo una placa muerta mal ajustada, un Trigger mal alineado, los lentes sucios, una imagen mal definida y todo lo concerniente a una buena inspección.

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se puede evidenciar en las imágenes se han logrado valores de rechazo muy significativos ya que se deja de reprocesar una gran cantidad de botellas que como se mostró y evidenció en el cálculo realizado tiene un valor muy alto cuantificándose en un año en dos líneas de envasado.

La línea 750 ha sido una de las líneas en donde mayores beneficios se han tenido puesto que con un rechazo del 12 o 14% es muy difícil lograr que la línea tenga continuidad y de una buena eficiencia, ésta en la actualidad maneja valores de 4 o 5% que aunque es alto es bueno puesto que esta botella por su tamaño y contorno presenta muchos defectos de fabricación.

Se hace el levantamiento de información valiosa que queda en un manual como fuente de consulta en el momento requerido e incluso en medios magnéticos. Se afianzan más los conocimientos de los técnicos para afrontar el día a día en la interacción con los equipos.

6. CONCLUSIONES

Se extrae información valiosa de los equipos y se compara con todos los inspectores para estandarizar el manejo de los equipos.

Se realizan las capacitaciones y se concientiza a los técnicos de la importancia de manejar estándares, se hace más fácil el trabajo cuando se hace en equipo y bajo los mismos principios.

Centralización del sitio de consulta como lo es el manual que se construyó, para canalizar dudas e inquietudes en los momentos requeridos.

Consolidación del trabajo en equipo puesto que con el transcurrir del tiempo se han aclarado dudas y se ha buscado alternativas que ayudan al equipo y a la empresa. Y mejora la productividad desde todo punto de vista, primero porque al tener menos rechazo las líneas tienen más continuidad y se generan menos reprocesos.

Con el análisis de modos y efectos de falla realizado a los equipos críticos de la línea y teniendo en cuenta el número de prioridad de riesgo (RPN), ejecutando las modificaciones del plan de mantenimiento propuesto y utilizando el plan de implementación con las etapas propuestas.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda que para elevar la eficiencia promedio de la línea y mantenerla constante, se debe empezar por facilitar herramientas y capacitar mejor a las personas encargadas de registrar la base de datos de la operación de equipos como el Inspector de envase, para que sea posible identificar cual es realmente el evento que se presenta, y si es en la parte operativa o mecánica del equipo. El registro de la información de los tiempos perdidos debe ser claro y preciso. En repetidas ocasiones se encuentran incoherencias en tiempos perdidos registrados y no son claros los avisos generados de la parada y la causa de la falla.

REFERENCIAS

Campos, V; TQC: *Controle da Qualidade Total (estilo japonês).* Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1992.

Wheeler, D. J.; Chambers, D. S. *Understanding Statistical Process Control.* 3a ed. SPC Press, Knoxville – Tennessee, 2010.

Ribeiro, J. ; C. S. Caten, *Série Monográfica Qualidade – Controle Estatístico do Processo.* Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2012, 172p.

García, M. Quispe, C. and Ráez, L., *"Mejora continua de la calidad en los procesos,"* Industrial Data, Vol. 6, no. 1, pp. 89-94, agosto de 2003.

Montgomery, D.C., 2009. Introduction to Statistical Quality Control 6th ed., John Wiley & Sons.

Minitab (2000). *Minitab (Version 13.0) [Computer software].* State College, PA: Author.

Campos, R.; Rocha, R. "O controle estatístico de processos (CEP) para o monitoramento da qualidade do farelo lex no processo do óleo de soja na empresa CAC". n: IV Encontro de Produção Científica e Tecnológica, 4, 2009, Campo Mourão – PR. Anuais. Campo Mourão: NUPEM, 2009, p. 13.

ANALISIS DE ACERO LAMINADO ANTES Y DESPUÉS DE SOLDADO, MEDIANTE PRUEBAS DE METALOGRAFÍA Y MACROATAQUE.

ANALYSIS OF STEEL LAMINATED BEFORE AND AFTER SOLDIER, THROUGH METALLOGRAPHY AND MACRO ATTACK TESTS

MSc (C) Fabián Leonardo Higuera Sánchez 1, MSc (C) Luis Fernando Acosta Joya 2, MSc. Juan Rodrigo Salamanca Sarmiento3, Mateo Acero Becerra4 (E)

*** Universidad Santo Tomás, 1** Ingeniería Mecánica, GIDINT.
Cll. 19 Nº 11 - 64 Tunja – Boyacá, Colombia. 57 (8) 7440404.
fabian.higuera@usantotot.edu.co, luis.acosta@usantoto.edu.co,
juan.salamanca@usantoto.edu.co, mateo.becerra@usantoto.edu.co

RESUMEN: Este trabajo estudia el acero AISI-SAE 1020, que se encuentra en el mercado en diversos perfiles y tamaños, mediante el empleo de dos ensayos: Metalografía (en dirección axial y transversal) y Macro ataque. La información referente a propiedades mecánicas se encuentra en catálogos del productor, sin embargo las propiedades evaluadas corresponden a evaluación de la conformación metalográfica de dos productos laminados (Lamina y perfil cuadrado), en dos direcciones (largo y ancho), antes y después de la soldadura. Paralelo se realizó un macro ataque a las muestras antes y después de la soldadura, para determinar las variaciones en la estructura del material. El manejo de las muestras se hizo en grupos por cada ensayo. El resultado de estos ensayos, presenta variaciones con respecto a documentos previos (libros y artículos), que se explican mejor al contrastar estas dos técnicas de evaluación de los aceros.

PALABRAS CLAVE: Acero, Laminado, Metalografía, Macro ataque.

ABSTRACT: The present work studies the commercial steel classified as Low Carbon Steel, which is in the market in different profiles and sizes, through the use of two tests: Metallography (in axial direction and transverse direction) and Macro-attack. The information regarding mechanical properties can be found in the producer's catalogs, however the properties evaluated correspond to magnitudes or directions of the material, for this reason the present work evaluates the metallographic conformation of two laminated products (sheet and square profile), in two directions (length and width), before and after applying the welding. In the same way, a macro-attack was made on samples of the profiles before and after the welding application, to determine the variations in the structure of the materials. The handling of the samples was done in test groups for each trial.The result of these tests, presents some variations with respect to previous documents (books and articles), which are better explained by contrasting these two techniques of evaluation of steels.

KEYWORDS: Steel, Laminate, Metallography, Macro-attack.

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura es un proceso ampliamente utilizado en la fabricación de diferentes tipos de estructuras, por esta razón es importante predecir sus efectos sobre el material de las juntas y su influencia en la estructura y las tensiones que se puedan generar por el proceso mismo, diversos esfuerzos se han realizado en esta dirección, como el diseño de una red neuronal artificial (RNA) para estimar el esfuerzo de fluencia en función de la composición química y dureza de aceros micro aleados de alta resistencia (López, E, et al., 2014).

De igual forma se deben estudiar los aspectos físicos, químicos y de granulometría, como el análisis micro estructural de tres diferentes aceros de alta resistencia respecto a la susceptibilidad al agrietamiento asistido por hidrogeno (HAC) y determina que la técnica es una opción viable de bajo costo para examinar la microestructura en aceros de alta resistencia (Kumar et al., 2017).

También se hace necesario el estudio del material de aporte y sus propiedades mecánicas, como el estudio que analiza el comportamiento del depósito de diferentes electrodos: E- 7018, E- 312-16 y UPT 65, empleados en la soldadura del acero AISI 4340 (Acero tipo cromo- níquel- molibdeno). Determinando las propiedades mecánicas de cada uno por medio de un ensayo destructivo (Ruiz, A, 2016). Estos aspectos se conjugan para evaluar diversas situaciones antes y/o después del proceso de soldadura, por esta razón son necesarios análisis como el estudio de una tira de acero en fase dual producida por fundición, y sometida a laminación en frio y recocida durante 3min, para evaluar las regiones de ferrita, martensita y no recristalización (He-song etal., 2017) determinan que el tratamiento reduce la resistencia a la tracción y aumenta la elongación comparado con el acero no templado.

Diversos estudios buscan facilitar el proceso de soldadura disminuyendo las afectaciones del calor en la estructura del material, de esta forma Mohsenzadeh y Mazinani en 2017 desarrollan un modelo micromecánico para analizar y predecir el isótropo y contribuciones cinemáticas para el endurecimiento en el trabajo de aceros de bajo carbono en función con la microestructura incluida el radio de las partículas y la fracción de volumen.

Así como Qiao y colaboradores en 2017 quienes unieron Niti con acero inoxidable por medio de la soldadura por resistencia para aplicaciones en biomédica, analizando la reducción del área de microestructuras conjuntas y sus respectivas propiedades mecánicas, de la misma manera se han desarrollado ayudas computacionales y simulaciones para estudiar la propagación de grietas por fatiga en la zona afectada por el calor de las juntas de soldadura (López et al., 2016).

Para la elaboración de juntas soldadas se hace necesaria una hoja de ruta para evidenciar los criterios de diseño necesarios en la elaboración de un procedimiento de soldadura WPS, en una junta soldada como la desarrollada en una conexión de 16” de diámetro para dos tanques de almacenamiento de crudo de 50 mil barriles (Rosero, R, 2017). Estos procedimientos documentan los procesos especiales como los que describen la unión de placas laminadas dúplex 2205 de acero inoxidable por soldadura GTAW y SMAW que analizan la corrosión, resistencia en los puntos afectados por el calor, las propiedades mecánicas y la morfología de la superficie de fractura en las uniones soldadas y verifican que por soldadura GTAW la resistencia a la corrosión es más efectiva debido a la presencia de austenita secundaria (Makndoom et al., 2017).

El trabajo de la soldadura involucra principalmente la influencia del calor en todos los componentes de una unión, siempre previendo las afecciones que se generen por el proceso mismo, como se evidencia en el análisis de la fracción de martensita formada a una temperatura dada por debajo de la temperatura de inicio de la martensita donde se demostró que los aceros con tratamiento térmico y partición muestran un equilibrio entre fuerza y ductilidad (Huygue et al., 2017). También la inclusión de materiales adicionales al acero, han investigado la influencia de Inconel 182 en las propiedades mecánicas de soldaduras metálicas diferentes entre acero al carbono liso y barras de acero inoxidable utilizando SMAW por medio de análisis microestructurales y pruebas de microdureza (Ramírez, et al., 2016). Igualmente, Soria y colaboradores en 2015 investigan el efecto de los ciclos de tratamiento térmicos sobre la microestructura y propiedades mecánicas de un acero soldado mediante un análisis estadístico de varianza.

De la misma forma se estudian los tratamientos previos y posteriores a la soldadura en las propiedades mecánicas de un acero galvanizado soldado, las tensiones térmicas inducidas por el galvanizado en caliente y la superficie de fractura de las grietas, (DiGiovanni et al., 2017) . Por esta

razón y por qué la soldadura es un trabajo conexo con todas las operaciones de producción, se trabaja permanentemente en el desarrollo de nuevas técnicas, menos invasivas para el material y con menores tiempos de preparación y aplicación, todo lo anterior no solo con aceros especiales, también con los materiales de uso continuo, por esta razón se desarrollan estudios constantemente sobre estos temas, como el que busca entender el comportamiento microestructural del acero AISI 1025 al ser soldados con dos tipos de electrodos (6010 y 7018) observando las microestructuras obtenidas con cada electrodo, así como la dureza de cada caso (Reyes et al., 2018). Y por último un estudio que valida el presente trabajo y se refiere al estudio de la microestructura y sus posibles cambios con el calor generado por el proceso de soldadura.

Para la investigación se hizo probetas y así llevarlas al análisis metalográfico de tensión e impacto, las cuales se adquirieron del cordón de soldadura como del metal base 1045 y de la zona afectada por el calor y sugieren que el acero tiende a comportarse de forma frágil, por lo cual al momento de soldadura debe tomarse precauciones para evitar una microestructura frágil en la zona del calor (Terán et al., 2017).

El presente trabajo estudia las microestructuras de dos perfiles de acero AISI-SAE 1020, antes y después de la soldadura y corrobora los hallazgos mediante el uso de Macro Ataque y medida de dureza Brinell.

2. MATERIALES

2.1 Acero AISI-SAE 1020.

El AISI-SAE 1020, Corresponde a un acero al carbono con contenido de C de 0,2%, con este se fabrican diferentes perfiles y láminas, que se emplean principalmente en la industria de las estructuras.
La designación de este acero según la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales corresponde a: ASTM A36, variando las características de acuerdo al grupo y grado que se designe.

Tabla 1: Composición química AISI.SAE 1020.

Acero	%C	%Mn	$\%P_{max}$	$\%S_{max}$	$\%Si_{max}$
1020	0,18-0,23	0,3 -0,5	0,04	0,05	0,15-0,3

Fuente: Catálogo Diaco.

2.1.1. Lamina CR 6mm.

La lámina de acero 1020 que se encuentra comercialmente, tiene varias dimensiones como son: 1X2 m., 1,2X2,4 m. y 1X6 m., entre las más comunes. Para el estudio se trabajó con muestras de una lámina de medidas 1,2 mX 2,4 m. con un espesor de 6 mm. Posteriormente se analizó la orientación de laminación de la lámina, con el fin de identificar la deformación de la granulometría y en qué direcciones.

Como resultado se determinó que el lado de 2,4 m, es el ancho del proceso de laminación y el lado de 1,2 m., es el lado longitudinal de la laminación, lo anterior teniendo en cuenta que la producción de este material se da en trenes que producen material de ancho 2,4 m. y se corta a longitud de 1,2 m.

El análisis direccional corresponde a las orientaciones que se van a revisar mediante metalografía.

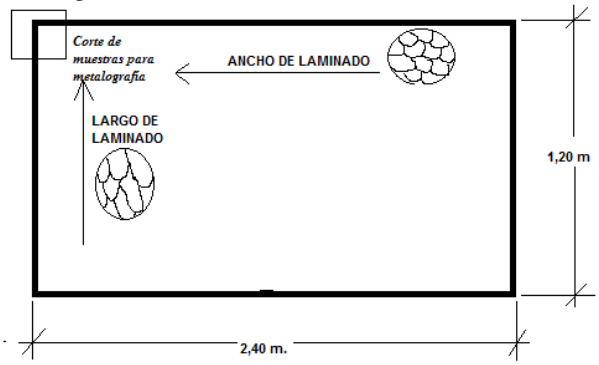


Figura 1: Análisis de laminación.

2.1.2. Perfil cuadrado de 10 mm.

Este perfil se presenta como barras de sección transversal cuadrada y puede venir en diversas medidas, que se designan por la dimensión lateral así: Cuadrado de ½", 10 mm, 9 mm, 6 mm, etc. Este perfil tiene bajo contenido de carbono, lo que facilita la ductilidad y soldabilidad. La norma de

fabricación para Colombia es la NTC 422; SAE 1015, y se presenta en varillas de 6 metros.
Para este perfil, también se hizo corte de muestras de 3 centímetros para metalografía del área transversal, y 4 centímetros para la metalografía de la sección longitudinal.

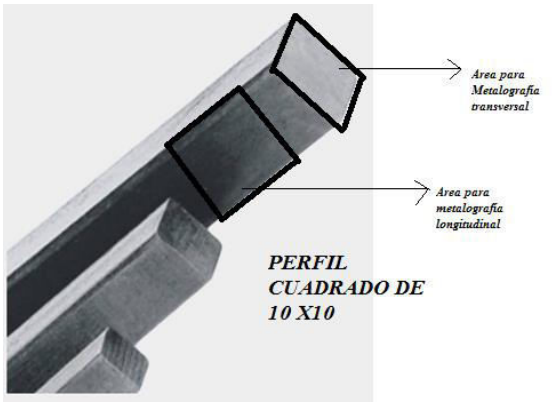


Figura 2: Análisis de laminación.

2.2Equipos

2.2.1. Mesa metalográfica.

La máquina empleada en las etapas de desbaste grueso, medio y fino, pulido con paños, es un equipo con dos platos, con control de velocidades y dosificador de agua. Las características descritas, hacen del pulido metalográfico un ensayo bastante rápido y efectivo.



Figura 3: Mesa metalográfica.

2.2.2. Microscopio metalográfico.

El aparato óptico empleado en este trabajo es un Microscopio Binocular con cuatro objetivos (100X, 200X, 300X, y 400X aceite), este equipo funciona con la reflexión de la luz emitida por una fuente propia.

2.3 Reactivos.

Los reactivos empleados en este estudio, son específicos en calidad y proporción. Estos se emplearon en el ensayo Metalográfico el Nital al 5% y en el Macro Ataque el ácido clorhídrico

2.3.1. Nital al 5%.

El Nital al 5%, es una solución de ácido Nítrico y agua destilada, en proporciones 5% de ácido y 95% de agua, se emplea en el ataque a las muestras metalográficas de aceros.

2.3.2.Ácido Clorhídrico.

El Clorhídrico es uno de los ácidos más activos, tanto que en sus presentaciones o diluciones se observa siempre emitiendo vapores. En este trabajo se empleó ácido clorhídrico (30%), diluido en alcohol (70%) para realizar el Macro Ataque de las muestras soldadas y cortadas.

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño de muestras.

Para el desarrollo de este trabajo se quiso evaluar la conformación metalográfica en dos direcciones: ancho y largo, de dos productos de acero en los perfiles de lámina y perfil cuadrado.

Para analizar los resultados se propone contrastar la microestructura de los materiales con ensayos de metalografía, macro ataque y dureza. Lo anterior para evaluar muestras de acero de forma individual con los tres ensayos, y hacer juntas para soldar y examinarlas también, mediante los tres ensayos mencionados.

En consecuencia se prepararon:
-4 muestras de ***lámina cortada en sección transversal*** para metalografía y macro ataque.
-4 muestras de ***lámina cortada en sección longitudinal*** para metalografía y macro ataque..
-4 muestras de ***perfil cuadrado 10 X 10 mm. en sección longitudinal*** para metalografía y macro ataque..

-4 muestras de ***perfil cuadrado 10 X 10 mm en sección transversal*** para metalografía y macro ataque.
-4 muestras dobles de ***lámina cortada para junta soldada a tope*** para metalografía y macro ataque.
-4 muestras dobles de ***perfil cuadrado 10 X 10 mm., para junta soldada a tope*** para metalografía y macro ataque.

Con estas muestras, se procede a confirmar la deformación de la granulometría debida al proceso de laminado en la fabricación de los perfiles, posterior a este se hizo el macro ataque a las muestras y finalmente se realizó sobre la probeta de metalografía, pruebas de dureza en el metal.

3.2. Muestras para metalografía.

Las muestras que se prepararon para metalografía se distribuyeron así:
-4 muestras de lámina AISI-SAE 1020, para metalografía longitudinal. (Figura 4).

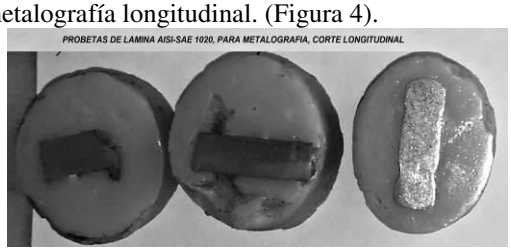


Figura 4: Probetas metalografía longitudinal

-4 muestras de lámina AISI-SAE 1020, para metalografía transversal o a lo ancho.(Figura 5)

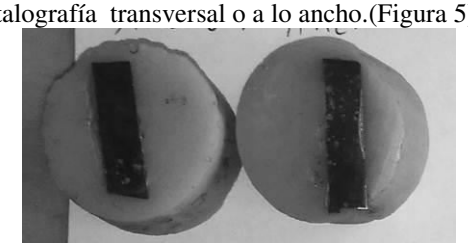


Figura 5: Probetas metalografía transversal

-4 muestras de cuadrado de 10X10 AISI-SAE 1020, para metalografía longitudinal.(Figura 6)
.

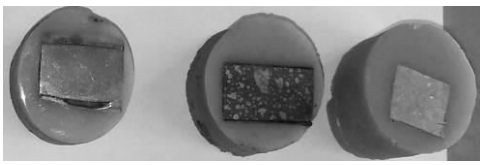


Figura 6: Probetas cuadrado 10X10-Long.

-4 muestras de cuadrado de 10X10 AISI-SAE 1020, para metalografía transversal o a lo ancho.(Figura 7).

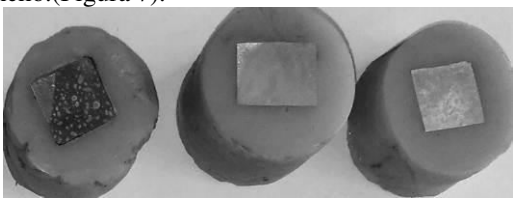
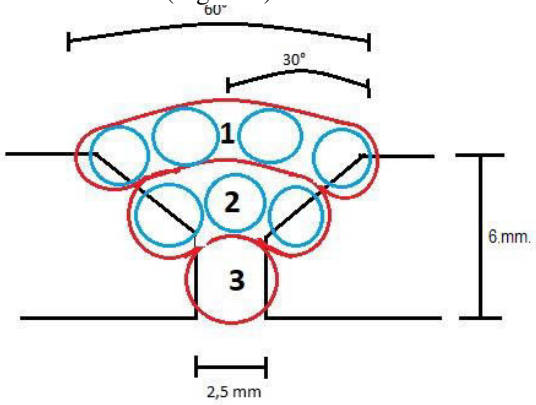


Figura 7: Probeta Cuadrado 10X10-Ancho.

-2 muestras de junta a tope soldada de lámina AISI-SAE 1020.(Figura 8).



1. Cordon de soldadura con electrodo 6013 de 5/32"
2. Cordon de soldadura con electodo 6013 de 1/8"
3. Cordon de soldadura con electrodo 6013 de 5/32"

Figura 8: Diseño de la junta a soldar en lámina.

-2 muestras de junta a tope soldada de cuadrado 10X10 AISI-SAE 1020.(Figura 9)

3.3 Muestras para Macro ataque.

Para este ensayo, se tomaron muestras de los materiales, así:
-2 muestras de lámina de 6 mm de espesor.
-2 muestras de cuadrado 10X10 mm.
-2 uniones a tope soldadas de lámina de 6 mm de espesor.
-2 uniones a tope soldadas cuadrado de 10X10 mm

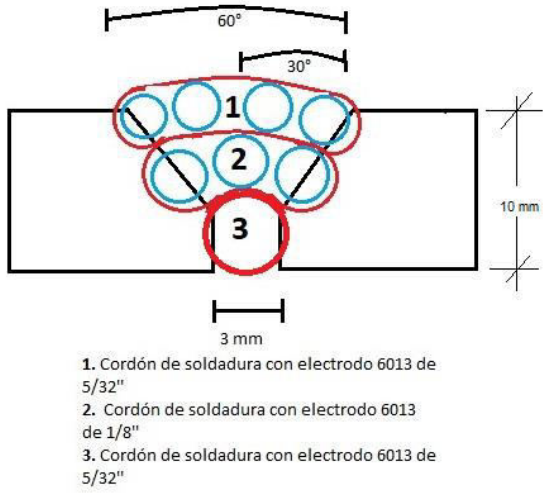


Figura 9: Diseño de la junta a soldar en cuadrado 10X10

3.4. Muestras para Ensayo de dureza.

Para el ensayo de dureza, se tomaron dos muestras de junta soldada de lámina y 2 muestras de junta soldada de cuadrado, y se realizaron, tomas de dureza en tres zonas de la soldadura: Metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura (Figura 10).



Figura 10: Puntos de toma de dureza en la soldadura.

4.RESULTADOS

4.1. Metalografía de laminados previos.

El ensayo de metalografía se realizó a tres elementos, con el fin de identificar la variación en la forma del grano en dirección longitudinal, contrastado con la dirección transversal del mismo material.

Por esta razón se evaluaron, muestras de perfil cuadrado de 10 mm, y de lámina de 6 mm. También se realizó la metalografía de las juntas soldadas a tope de los dos perfiles mencionados anteriormente.

Para el proceso de Metalografía se cumplieron las etapas de: Corte, pulido grueso con disco abrasivo y lija 80; para pulido medio y fino se emplearon los abrasivos número 150, 220, 320, 400 y 600. Posteriormente se realizó el pulido con paños y como abrasivo se empleó polvo de alúmina. Finalmente se hizo ataque químico a todas las muestras, con Nital al 5%, por un tiempo de 5 segundos cada muestra.

La primera parte de la metalografía, busca definir la microestructura de los materiales antes del proceso de soldadura para determinar la afectación que se produce en la microestructura del acero con la aplicación de la soldadura, que transformaciones se suceden y en qué zonas.

4.1.1. Metalografía de lámina de 6mm.

De las cuatro muestras que se prepararon para metalografía, se tomaron micrografías a la lámina a 100X (figura 11) y 300X (figura 12).

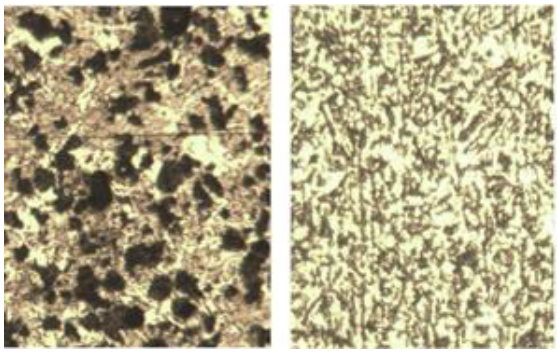


Figura 11: Micrografía de lámina de acero a 100X sección longitudinal y transversal.

Esta micrografía muestra un componente claro en mayoría, con dispersión de material gris (perlita), los puntos negros son cavidades de poca altura.

El mismo material a 300X, muestra los componentes del acero, matriz ferrítica y zonas perlíticas(gris).

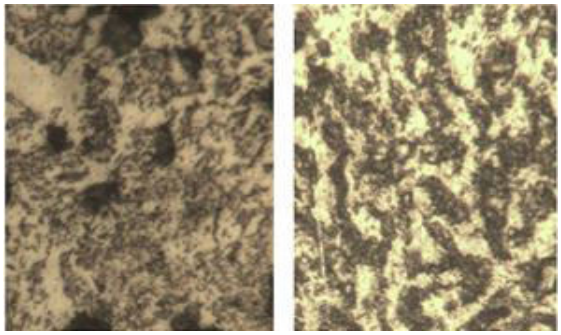


Figura 12: Micrografías de lámina de acero a 300X, sección longitudinal y transversal.

4.1.2. Metalografía de cuadrado 10X10 mm.
De igual manera se tomaron micrografías a lo largo y ancho del perfil cuadrado de 10X10 mm., a 100X (figura 13) y a 300X (figura 14).

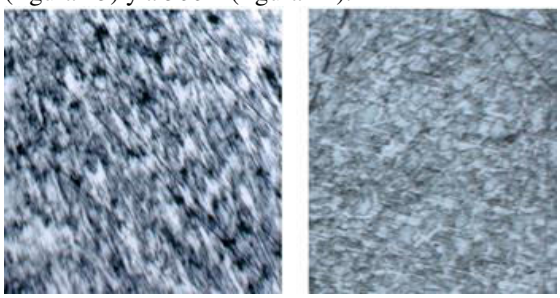


Figura 13: Micrografías de cuadrado de 10 mm, sección longitudinal y transversal 100X.

Las micrografías presentan mayor diferencia en la configuración y dirección del tamaño de grano entre el ancho y largo.

En las micrografías anteriores se presenta a la izquierda la conformación granular a lo largo del perfil, y a la derecha se presenta micrografía de estructura transversal.

4.2. Metalografía de soldaduras.
Como se indicó en el numeral 3.4., se tomaron seis datos de dureza por cada zona (3) de cada probeta de soldadura, las zonas definidas son: el cordón, la zona afectada por el calor y el metal base.

Se decidió tomar solo tres zonas debido a que la inclusión de zonas intermedias dificulta su definición y exige el empleo de elementos de exactitud en un área bastante pequeña, por esta razón la definición de las zonas es segura en cuanto a su ubicación.

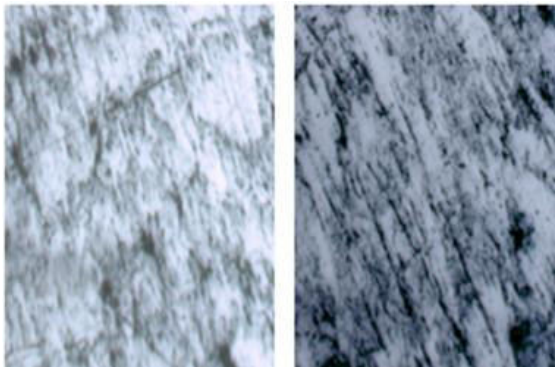


Figura 14: *Micrografías de cuadrado de 10 mm, sección longitudinal y transversal 300X.*

Como evidencia, se tomaron micrografías a 100X y 300X de cada punto. Las figuras que se presentan a continuación son representativas, teniendo en cuenta que el alto número de micrografías presenta alternativas en los resultados.

4.2.1 Metalografía de lámina CR. soldada.
Como se explicó en el punto anterior, luego de realizada la soldadura de la lámina, se procedió a cortar y montar en resina la muestra de soldadura, para realizar el proceso metalográfico, y como resultado obtener las microestructuras en las 3 zonas del material soldado.(Figura 15).
.



Figura 15: Probeta de soldadura, pulida y atacada con las zonas marcadas

Con ese modelo indicado se inició con el material base, que supone una afectación mínima por el calor de la soldadura.

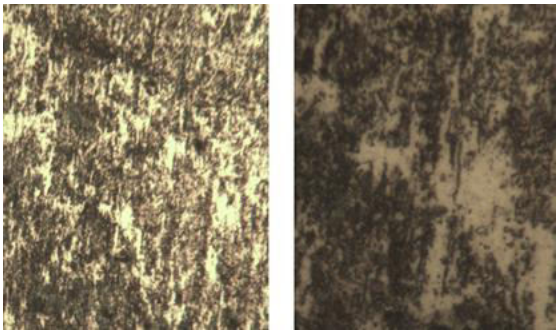


Figura 16: Micrografía lámina de acero soldada a 100X y 300X, en el metal base

La figura 16, presenta el mismo material y corte, con dos aumentos diferentes, a 100X, se muestra una matriz ferrítica, con grano alargado, al igual que las zonas grises (perlita). Se puede observar que la deformación del grano es bastante notoria, debida al proceso de fabricación.

En la figura 17 se aprecia la estructura de la microestructuras a 300X del material evaluado en la zona afectada por el calor. En esta figura se puede ver una formación de granos alargados y con puntas, aspecto de martensita que hace muy dura esa área y puede generar grietas.

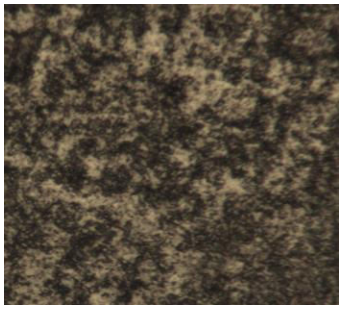


Figura 17: Vista de lámina soldada a 100X y 300X, en la zona afectada por el calor.

Las figuras siguientes presentan la conformación granular del cordón de soldadura, visto a 100X y a 300X.

.

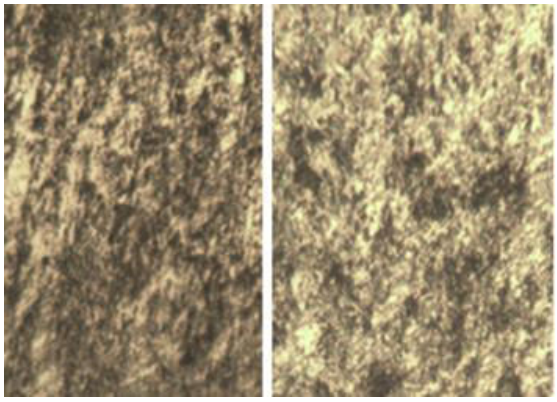


Figura 18: Cordón de soldadura a 100X y a 300X.

En la figura 18, se puede apreciar que la estructura formada es de granos gruesos que se orientan hacia un mismo lado, que puede ser la dirección de solidificación.

4.2.2. Metalografía cuadrado 10 mm soldado.
Teniendo como referencia la estructura del perfil cuadrado, que se obtuvo en el numeral 4.1.2., se analizó la micrografía de las áreas de la soldadura del perfil cuadrado (Figura 19)

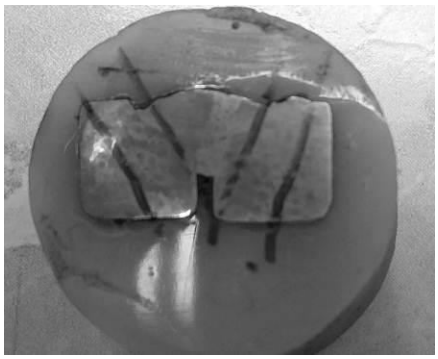


Figura 19: Probeta de metalografía del perfil cuadrado y las zonas a analizar

El perfil cuadrado presenta una diferencia mayor entre la microestructura longitudinal y la transversal, por esta razón es importante definir bien las zonas de análisis y las respectivas microestructuras.

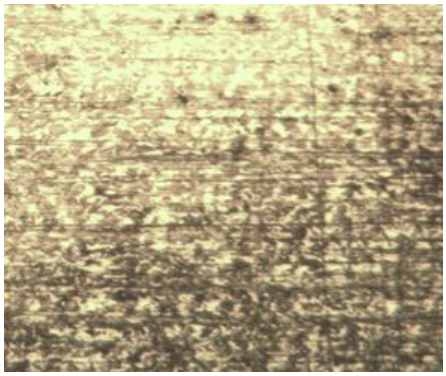


Figura 20: Material base de perfil de acero soldado

En la figura 20 se observa un material con tamaño de grano pequeño, con matriz ferrítica y granos grises (perlita) orientados ligeramente en forma de flujo.

Es importante revisar la microestructura de la zona afectada por el calor, teniendo en cuenta que por las áreas pequeñas que presenta el perfil, se puede presentar un mayor efecto del calor en el acero.

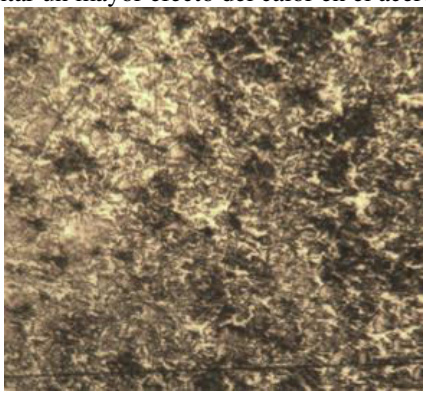


Figura 21: Perfil 10 mm soldado en zona ZAC.

En la figura 21 se puede observar la típica distribución de grano martensítico, sin embargo se advierte que el tamaño de grano es pequeño, lo que disminuye el daño de la estructura martensítica.

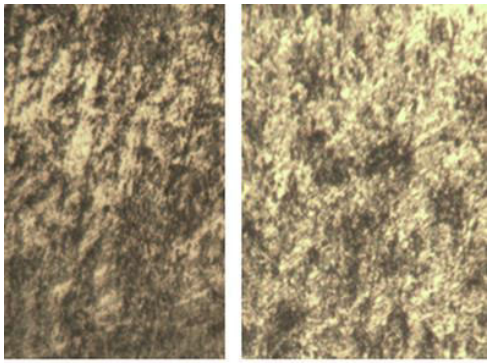


Figura 22: Perfil 10 mm soldado en cordón a 100X y 300X.

En la figura 22, se observa la estructura granular del cordón de soldadura, que comparado con las otras zonas, se ve más compacta y de grano más grande, además sigue una dirección que refiere a la solidificación del proceso de soldadura.

4.3 Macro Ataque.

El macro ataque, es una técnica de evaluación de materiales y fallas, que sirve en el proceso de evaluación de soldaduras, debido a que con esta práctica se puede detectar la configuración interna del cordón de soldadura y el metal base.

Una práctica sencilla de macro ataque se desarrolla de la siguiente forma:
-Corte u obtención de las muestras a evaluar.
-Limpieza y desengrasado de las muestras.
-Calentamiento a 70°C de agua, para sumergir las piezas por 10 minutos.
-.Inmersión de las piezas en ácido clorhídrico diluido al 30%, durante 10 minutos, con agitación constante.
-lavado de las piezas con agua, posterior a esto se secan las piezas y se observan los resultados.

En las imágenes que siguen se pueden ver los macro ataques realizados a las piezas y juntas soldadas.

4.3.1. Macro Ataque a soldadura de lámina CR.



Figura 23: Lámina soldada, con macro ataque.

En la figura 23, se observa una soldadura de dos láminas de acero AISI-SAE 1020, en est, además del defecto de falta de fusión en la raíz, se pueden observar los cordones depositados, el área de penetración de la soldadura, y en diversos tonos otras áreas como la ZAC.

4.3.2. Macro Ataque de cuadrado 10X10 mm.

El macro ataque a la soldadura del perfil cuadrado, también presento detalles importantes, además de evidenciar la dificultad para soldar este perfil.



Figura 24: Perfil 10X10 mm. soldado, con macro ataque.

En las imágenes de la figura 24, se pueden ver dos muestras de perfil cuadrado de 10X10 mm, soldado, y se puede apreciar los cordones de soldadura, de la misma forma se observan áreas decoloradas que indican diferente cristalización.

4.4. Ensayo de dureza.

El ensayo de dureza se realizó a dos probetas preparadas para este fin, tomando las mediciones, en las áreas ya definidas, como se muestra en la figura 9. En la tabla 2, se muestran los resultados de la toma de durezas en los dos especímenes evaluados.

Tabla 2: Resultados de dureza de dos muestras, en las tres zonas de la soldadura.

Medición de dureza en zonas de soldadura					
MUESTRA	ZONA	HBr-1	HBr-2	HBr-3	Prom. HBr.
1	Metal base	187	192	178	185,7
	Metal base	173	180	185	179,3
	ZAC	303	310	290	301,0
	ZAC	315	321	297	311,0
	Cordon	245	231	256	244,0
	Cordon	240	246	239	241,7
2	Metal base	177	189	193	186,3
	Metal base	190	184	201	191,7
	ZAC	312	323	298	311,0
	ZAC	307	304	306	305,7
	Cordon	233	240	245	239,3
	Cordon	238	246	241	241,7

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Evaluación de tamaño de grano y dirección en perfiles sin soldadura.

Los perfiles trabajados (lámina de 6 mm y perfil cuadrado de 10X10 mm), presentan resultados similares en cuanto a las direcciones y tamaño de grano así:

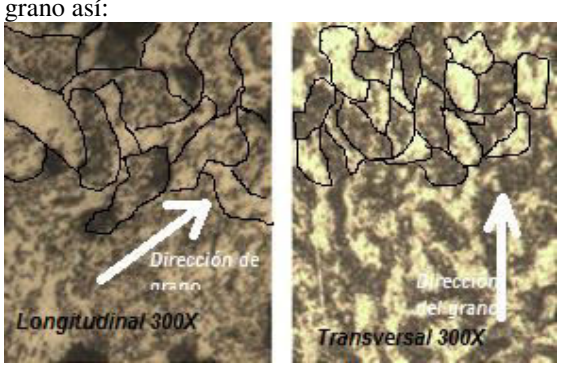


Figura 25: Comparación granular y de dirección de lámina de 6mm AISI-SAE 1020

La lámina de 6 mm de espesor muestra un tamaño de grano medio (300 X), pero la longitud del grano se ve diferenciada la sección transversal con la longitudinal.

En la sección transversal el grano es alargado (figura 25), pero en relación con el ancho, se puede evaluar una proporción de 1:2, mientras que se

observa más largo el grano en la sección longitudinal.

De lo anterior concluimos que el material en bruto ya trae unas tensiones generadas por el alargamiento de grano, lo que contribuye con el endurecimiento del material posterior al proceso de soldadura.

Para el perfil cuadrado de 10 X 10 mm., se puede verificar que se mantiene la proporción 2:1 de ancho por largo de los granos en la sección transversal, mientras que en la sección longitudinal, el largo del grano se nota mayor la proporción, llegando a niveles de 4:1 y casos mayores.

En la figura 26 se puede apreciar la diferencia del tamaño de grano entre la micrografía longitudinal que es mayor y la micrografía transversal que es de menor proporción.

En ambos casos la dirección del grano alargado, corresponde al laminado efectuado en la producción del material y se nota menor alargamiento del grano en el área transversal y la dirección deja ver que el proceso de laminado aplicó fuerzas contrarias que evitaron el alargamiento del grano, incluso presentándose algunos granos de proporciones equiaxiales.

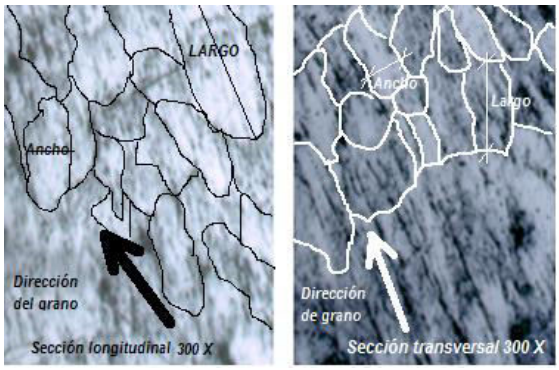


Figura 26: Micrografía de cuadrado 10 X 10 mm., dirección y proporción de grano a 300 X

5.2 Evaluación de tamaño de grano y dirección en perfiles soldados.

El estudio micrográfico que se realizó tuvo en cuenta los cambios ya conocidos que se suceden en el material.

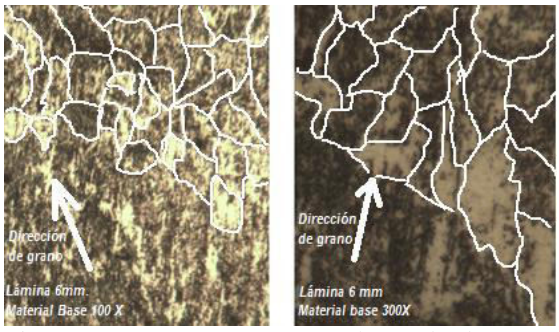


Figura 27: *Comparación granular y de dirección de lámina de 6mm AISI-SAE 1020 soldada.*

En la figura 27, se observa de acuerdo a la proporción granulométrica de la muestra, que la soldadura se hizo paralela a la sección longitudinal del grano, de acuerdo a que la granulometría de las figuras se presenta de proporciones aproximadas de 1:2 (ancho: largo).

La orientación granular corresponde a un material laminado y no se evidencia afectación por proceso de transformación posterior, es decir se puede asegurar que esta sección no se vió afectada por el calor generado por la soldadura, en las dos vistas (100 X y 300X), existe correspondencia en tamaño y dirección.

.

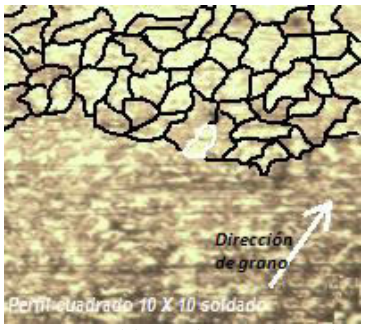


Figura 28: Material base de perfil cuadrado.

En la figura 28 se observa el material base de la junta del perfil cuadrado, en esta figura no se notan cambios o aspectos anómalos, además de entender que la microestructura es de un grano ligeramente alargado en la dirección del laminado del perfil, y

que a pesar de que la distancia con la soldadura es pequeña, esta no afectó en su totalidad al material.

El área a vigilar en la soldadura, corresponde a la Zona de afectación térmica, que es cercana al cordón de soldadura y su tamaño depende de la cantidad de cordones que se depositan en la unión, así como las temperaturas que se alcanzaron durante el proceso.

En la figura 29 se puede ver la microestructura de la lámina a 300X, correspondiente a una estructura de martensita con grano alargado, pero sin sobrepasar proporcionalmente, la distribución del material original.



Figura 29: ZAC de junta soldada de lámina 6mm.

Es importante tener en cuenta que la martensita genera tensiones, pero que la característica indispensable las puntas de la granulometría, lo que genera la acumulación de tensiones, por esta razón se aconsejan tratamientos de revenido, que eliminan las puntas de los granos martensíticos.

Para el perfil cuadrado de 10X10 mm., se espera que la incidencia de la zona afectada por el calor sea mayor, teniendo en cuenta que la longitud de los granos en la sección longitudinal es mayor en proporción en el cuadrado comparado con la lámina.

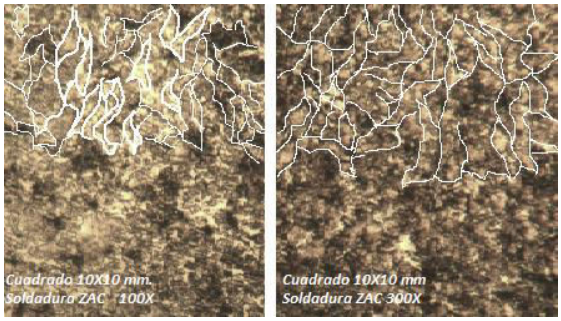


Figura 30: ZAC de junta soldada de cuadrado 10X10 mm.

En la figura 28 se tienen las micrografías de una junta soldada de perfil cuadrado, en la Zona afectada por el calor, a 100X y 300X, en ellas se verifica que en el área transversal, se encuentra una granulometría regular con granos martensíticos, con una deformación ligera.

Lo anterior indica que debido al poco material para evacuar el calor durante el proceso de soldadura, se alcanza un tratamiento de revenido, que suaviza el impacto del calor en la estructura. Finalmente revisamos la microestructura del cordón en ambos materiales (lámina y perfil cuadrado)

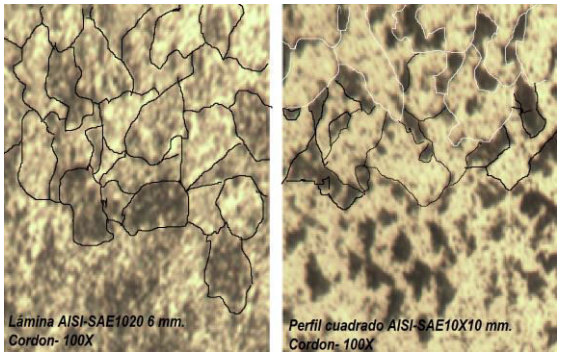


Figura 31: Comparación entre estructura de cordón en soldadura de lámina y perfil cuadrado.

En la figura 31, se ve la micrografía del acero AISI-SAE 1020, en lámina de 6 mm y cuadrado de 10 mm. En ambos casos se nota un tamaño de grano grande, que se privilegia por estar en el centro del calor generado, adicionalmente, debido a que la solidificación se realiza mientras se aplica el cordón, la microestructura genera una dirección de crecimiento de grano, provocando una estructura

de grano columnar, como se puede ver en ambas figuras. Esta configuración presenta buenas propiedades mecánicas, pero en la medida que se agranda el grano, debido a calor permanente, se corre el riesgo de fragilizar el metal.

5.3 Evaluación soldadura mediante Macro Ataque.

Como se indicó anteriormente, el Macro Ataque es un ensayo que sirve para evaluar herramientas, materiales y estructuras, de forma rápida y entregando gran cantidad de información. Para la evaluación de lámina soldada de 6 mm., mediante Macro Ataque, se siguió el procedimiento explicado anteriormente.



Figura 32: Macro ataque a soldadura de lámina AISI-SAE 1020 6 mm.

En la figura 32 se puede apreciar el resultado del macro ataque a la soldadura de una lámina de 6 mm de espesor. En esta muestra se puede apreciar por diferenciación de colores:

-El área de la soldadura con la cantidad exacta de cordones.
-La magnitud de la penetración de la soldadura.
-La Zona Afectada por el Calor (ZAC) y su tamaño.
.las áreas que se recristalizan por el proceso.
-La proporción de material base que no se afecta.
La otra prueba de Macro ataque que se realizó, fue al perfil cuadrado de 10 X 10 mm., al que también se le realizó chaflán de 60° y se le aplicaron 3 cordones a la junta.

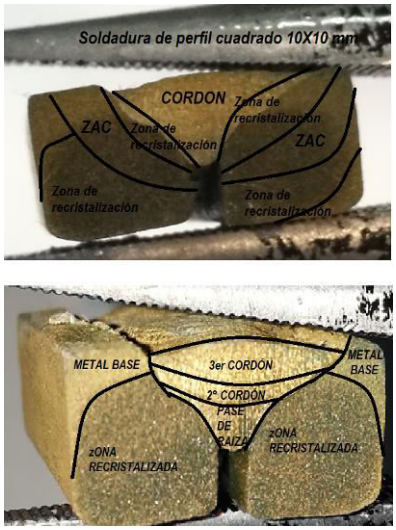


Figura 33: Macro ataque a la soldadura de perfil cuadrado AISI-SAE 10 X 10 mm.

En la figura 33 se ven las áreas generadas en el material durante el proceso de soldadura, los cordones aplicados, la zona de afectación por el calor, y zonas de recristalización.

6. CONCLUSIONES.

-El acero AISI-SAE 1020, es uno de los materiales más empleados en la industria metalmecánica y de las estructuras.
-Los productos que se comercializan en este acero, son variados, y van desde fundidos hasta laminados.
-Los procesos de laminado de estos aceros siempre dejan estructuras cristalográficas afectadas para el uso permanente.
-Las láminas son productos que durante su fabricación son sometidas a procesos de disminución de espesores.
-Todos los materiales laminados presentes en el mercado tienen deformación cristalográfica, de forma permanente y pueden ser aumentados estos niveles de deformación durante su uso.
-El aumento en los niveles de deformación granulométrica, disminuyen la vida útil de los materiales, por fracturas, corrosión, ablandamientos, etc.
-Las barras y perfiles presentan mayor cantidad de tensiones residuales, debidas a los altos niveles de

reducción de espesor a que son sometidos durante la fabricación.

-Los aceros laminados presentan todas unas direcciones de mayor deformación y por consiguiente esa dirección facilita la nucleación de fallas y defectos del material.

-El macroataque es una herramienta funcional y económica para la evaluación de partes y estructuras.

Las evidencias que presenta el macroataque solo se podrían lograr con la realización de Ensayos No Destructivos y sus respectivos costos.

-El presente trabajo aclaró las dudas sobre la funcionalidad del macroataque y su efectividad en la entrega de resultados.

-El acero AISI-SAE 1020, es un acero que por su composición y estructura cristalográfica, se puede usar en la mayoría de los proyectos de construcción.

7. REFERENCIAS.

DiGiovanni, C., Li, L., Driver, R., & Callele, L. (2017). Cracking in welded steel platform structures during hot-dip galvanization. Engineering Failure Analysis, 79, 1031-1042.

Huyghe, P., Malet, L., Caruso, M., Georges, C., & Godet, S. (2017). On the relationship between the multiphase microstructure and the mechanical properties of a 0.2 C quenched and partitioned steel. Materials Science and Engineering: A, 701, 254-263.

Li, Q., Zhu, Y., & Guo, J. (2017). Microstructure and mechanical properties of resistance-welded NiTi/stainless steel joints. Journal of Materials Processing Technology, 249, 538-548.

López, D. F. A., Pereira, R. C., Castro, Y. A., Sánchez, H., & Sabirov, I. (2016). Desarrollo de un método de simulación física de zonas térmicamente afectadas en soldaduras de acero, para estudios de propagación de grietas por fatiga. Facultad de Ingeniería, 25(42), 33-54.

López Martínez, E., Vázquez Gómez, O., & Campillo Illanes, B. F. (2014). Estimación del Esfuerzo de Fluencia de Soldaduras de Aceros Microaleados. Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo, 5(1), 273-279.

Makhdoom, M. A., Ahmad, A., Kamran, M., Abid, K., & Haider, W. (2017). Microstructural and electrochemical behavior of 2205 duplex stainless steel weldments. Surfaces and Interfaces, 9, 189-195.

Mohsenzadeh, M. S., & Mazinani, M. (2017). The effect of particles size on work hardening behavior of a low carbon steel with a composite-type microstructure. Materials Science and Engineering: A, 702, 113-124.

Ramírez-Soto, J. C. I., Salgado-López, J. M., Pérez-Quiroz, J. T., Pérez-López, T., Terán-Guillén, J., & Martínez-Madrid, M. (2016). Efecto del mantequillado en las propiedades mecánicas de uniones soldadas disímiles en barras de refuerzo para estructuras de concreto. Revista ALCONPAT, 6(3), 248-260.

Reyes-Carcasés, D., Fernández-Columbié, T., Alcántara-Borges, D., & Rodríguez-González, I. (2018). Soldadura con los electrodos revestidos E 6010 y E 7018 en acero AISI 1025. Minería y Geología, 34(1), 112-125.0

Rosero Jiménez, R. A. (2017). Desarrollo y calificación de un procedimiento de soldadura en servicio de accesorio para tanque bajo diseño API650 y requerimientos de ASME sección IX con el proceso de soldadura SMAW.

Ruiz-Magaña, A. I. (2016). Dominios magnéticos en piezas de acero AISI 4340 soldado con electrodos revestidos. Ciencia & Futuro, 6(3), 61-81.

Singh, D. K., Raman, R. S., Maiti, S. K., Bhandakkar, T. K., & Pal, S. (2017). Investigation of role of alloy microstructure in hydrogen-assisted fracture of AISI 4340 steel using circumferentially notched cylindrical specimens. Materials Science and Engineering: A, 698, 191-197.

Soria, J., Reyes, F., Carrillo, R., Garcia, F., Alvarez, H. y Silvia, L. (2015).Efecto del tratamiento termico sobre las propiedades mecanicas y microestructura de un acero para tuberia API 5CT J55. Ingenieria Investigación y Tecnologia (Volumen 4

Terán, J., Alcantara, M., Arroyo, M., Del Valle, A. y Lomelí, M. (2017). Evaluación de la integridad estructural del acero SAE/AISI 1045 SOLDADO POR ARCO MANUAL CON ELECTRODO RREVESTIDO (SMAW). Revistasomin (A2). Mexico.

Wang, H. S., Yuan, G., Kang, J., Cao, G. M., Li, C. G., Misra, R. D. K., & Wang, G. D. (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of dual phase steel produced by strip casting. Materials Science and Engineering: A, 703, 486-495.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

SELECCIÓN DE MATERIAL PARA LA ESTRUCTURA DE UN PANEL ACÚSTICO USADO EN EL AMBIENTE HOSPITALARIO

MATERIAL SELECTION FOR THE STRUCTURE OF AN ACOUSTIC PANEL USED IN THE HOSPITAL ENVIRONMENT

Paula Andrea Gómez Vélez[*], Sebastián Gallo Pizano[*], Nelson Javier Escobar Mora[*], María del Pilar Rivera Vega[*], Beatriz Janeth Galeano Upegui[*]

[*]**Universidad Pontificia Bolivariana,** Facultad de ingeniería.
Medellín, Antioquia, Colombia.
E-mail: {paula.gomezv, sebastian.gallop, nelson.escobar, mariad.rivera, beatriz.galeano}@upb.edu.co.

Resumen: El ruido es una problemática global que afecta especialmente los ambientes hospitalarios, ya que puede producir alteraciones en la salud y bienestar de las personas, y los pacientes al estar en un estado de vulnerabilidad son los más susceptibles a estas afectaciones. Desde el año 2015 se está trabajando en un panel acústico que permita reducir los niveles de ruido al interior de los espacios hospitalarios y que cumpla con las necesidades y normativas de este tipo de ambientes, por lo cual es importante considerar los materiales que se van a utilizar específicamente para la estructura del panel. Con este fin, se realizó un proceso de selección del material mediante el uso de matrices, en el cual se evaluaron cinco alternativas: acero inoxidable, aluminio, policloruro de vinilo (PVC), polipropileno y madera plástica. Se tuvieron en cuenta varios criterios de selección para considerar el desempeño de cada material en esta aplicación, donde se evidenció que el aluminio 6063 presentó características destacables respecto a los parámetros evaluados.

Palabras clave: Ambiente hospitalario, panel acústico, ruido, selección de material.

Abstract: Noise is a global problem that especially affects hospital environments, since it can produce alterations in the health and well-being of people, and patients being in a state of vulnerability are the most susceptible to these affectations. Since 2015 we are working on an acoustic panel that allows reducing noise levels inside hospital spaces and that meets the needs and regulations of this type of environment, so it is important to consider the materials that are going to Use specifically for the structure of the panel. To this end, a material selection process was carried out using matrices, in which five alternatives were evaluated: stainless steel, aluminum, polyvinyl chloride (PVC), polypropylene and plastic wood. Several selection criteria were taken into account to consider the performance of each material in this application, where it was evidenced that aluminum 6063 presented remarkable characteristics with respect to the parameters evaluated.

Keywords: Hospital environment, acoustic panel, noise, material selection.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido es considerado un factor de contaminación ambiental debido a que afecta la calidad acústica de los espacios y produce efectos negativos en las personas a nivel físico, psíquico y emocional (Restrepo Diaz, 2002).

Si bien el ruido se ha convertido en un gran inconveniente en los espacios abiertos, por ejemplo en lo referido a los niveles de ruido que se derivan del tráfico en vías principales o avenidas; es aún más preocupante la situación que se percibe en espacios interiores considerando que, en la actualidad, las personas pasan alrededor de un 80 % del tiempo al interior de diferentes tipos de edificaciones (Marcos & Pulgarín, 2005).

Frente a esta problemática, la industria de acondicionamiento acústico se ha manifestado ampliamente mediante diferentes alternativas que se ofrecen en el mercado para reducir los niveles de ruido en espacios como oficinas, teatros, estudios de grabación, entre otros (DATECSA, 2017; FIBERGLASS ISOVER, 2018).

No obstante, hay un sector que se encuentra completamente desprotegido en tema de acondicionamiento acústico: el sector hospitalario; esto se debe a que este tipo de entornos tienen una serie de requerimientos intrínsecos, específicamente en temas de aseo y limpieza, que no están cubiertos en la oferta comercial actual de acondicionamiento acústico.

Es por esto que en el año 2015 Rivera-Vega et al. (Rivera-Vega, Galeano-Upegui, Escobar-Mora, & Patiño-M., 2015) desarrollaron un panel acústico para uso en entornos hospitalarios, el cual tuvo como base los requerimientos propios de este tipo de ambientes donde es fundamental el tema de la seguridad y la higiene (Ministerio de salud y protección social, 2014). Con este panel se realizaron pruebas de usabilidad in situ que evidenciaron varias oportunidades de mejora, las cuales dieron el punto de inicio para realizar un proceso de diseño estructurado y replantear los requerimientos con el fin de enfocar la nueva versión del panel para que cumpla con las características necesarias correspondientes a los espacios hospitalarios y supla las oportunidades de mejora.

Una vez realizado el proceso de diseño, se seleccionó una alternativa estructural para el panel que cubre los requerimientos del ambiente hospitalario (ver Fig. 1), sin embargo, es importante que el material en que se fabrique la estructura también presente características específicas y propiedades que permitan cumplir los requerimientos propios del ambiente hospitalario.



Fig. 1. Alternativa de diseño seleccionada para el panel acústico

En este trabajo se realiza la selección del material más adecuado para llevar la alternativa de diseño a la etapa de construcción. Para esto se realiza un proceso de selección mediante la adaptación de los requerimientos del ambiente hospitalario que se pueden aplicar a las características del material.

2. METODOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente, la alternativa de diseño para la nueva versión del panel acústico nació de un proceso de diseño y selección estructurado en el cual se partió del planteamiento

del problema general y este se fue acotando con los requerimientos exigidos por la regulación que atañe a las instituciones prestadoras de servicios en salud. Pero, parte de este cumplimiento depende del material que se utilice para la construcción de la estructura, por lo cual se llevó a cabo una selección del material teniendo en cuenta las características del entorno hospitalario.

A continuación, se presentan las etapas mediante las cuales se realizó la selección del material estructural.

2.1 Requerimientos de diseño del panel acústico

Para determinar los requerimientos de diseño del panel se realizó una revisión de literatura y normativa asociada al ambiente hospitalario, lo cual permitió recopilar una amplia gama de requerimientos y, posteriormente, agruparlos con el fin de reflejarlos en las alternativas de diseño. Para el diseño estructural del panel se determinaron nueve requerimientos fundamentales que debía incluir el panel para ser utilizado en el ambiente hospitalario, los cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Requerimientos de diseño del panel acústico

No.	Requerimiento
1	Permitir la separación de espacios
2	Reducir el ruido
3	Lavable
4	Portable
5	Seguro
6	No generar obstaculización
7	Estético
8	Fácil de usar y manipular
9	No inflamable

El siguiente paso fue considerar estos requerimientos y seleccionar aquellos que tienen fuerte relación con las propiedades del material de la estructura y replantearlos con el fin de ponerlos en términos relacionados con las propiedades y características que el material debe cumplir para ser utilizado en el panel acústico. Así, se seleccionaron 5 requerimientos para el material del panel: lavable, portable, seguro, no inflamable y fácil de maquinar.

Estos requerimientos se reflejan en el material por medio de las propiedades técnicas del mismo, por lo que es importante identificar cómo se pueden relacionar las características técnicas del material con respecto a los requerimientos con el fin de crear criterios que permitan evaluar el comportamiento de cada material frente a las necesidades intrínsecas del ambiente hospitalario. En la Fig. 2 se evidencia cuáles de las propiedades de los materiales se vinculan con los requerimientos.

		Propiedades técnicas													
		Rugosidad	Peso específico	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad	Dureza	Temperatura de conducción térmica	Temperatura de flexión bajo carga	Temperatura de fusión	Comportamiento a la combustión	Propagación de la llama	Resistencia a sustancias químicas	Resistencia a la acción de hongos, bacteria	Permite usar tornillería	soldabilidad	Alargamiento a rotura
Requerimientos	Lavable	X										X	X		x	
	Portable		X	X										x		X
	Seguro		X			X										
	No inflamable						X		X	X	X					
	Fácil de construir			X	X			X						X	X	X

Fig. 2. Relación de las propiedades técnicas y los requerimientos del material

A partir de esto, se proponen alternativas de material que tienen características ajustables a los requerimientos y pueden ser utilizados en el ambiente hospitalario.

2.2 Alternativas para el material de la estructura

El ambiente hospitalario, como se mencionó anteriormente, exige ciertas especificaciones frente a las características de los materiales que se pueden utilizar en los entornos de atención al paciente. Particularmente, los materiales no deben ser porosos para evitar la acumulación de polvo en su interior, ya que esto contradice las condiciones de aseo y limpieza a nivel hospitalario (Ministerio de salud y protección social, 2014). Así mismo, materiales que puedan desprender fibras o material particulado están contraindicados para estos entornos ya que pueden generar contaminación del aire y producir afecciones respiratorias tanto en pacientes como en personal asistencial y acompañantes (Ministerio de Salud y Protección

social, 2018; Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 1979).

En este orden de ideas, es fundamental que el material permita la realización de acciones de limpieza, lo cual se logra con acabados lisos y suaves, además de resistencia a productos químicos, agua y a la proliferación de microorganismos en su interior (Ministerio de salud y protección social, 2014).

Todas estas características, junto con los requerimientos presentados en la Fig. 2 restringen la gama de materiales con posibilidad de uso en el ambiente hospitalario. Es por esto que se realizaron entrevistas con expertos para seleccionar cinco alternativas de material que pasen por un proceso de selección estructurado utilizando parámetros que permitan tomar una decisión sobre cuál es el material más adecuado para la aplicación específica del panel acústico.

Con las entrevistas y búsqueda de información se seleccionaron el acero inoxidable 304, el aluminio 6063, el PVC, la madera plástica (WPC) y el polipropileno como los cinco materiales que cumplen a cabalidad las necesidades puntuales del contexto hospitalario. Adicionalmente, se consideró el acero, ya que fue el material utilizado para la estructura en la versión previa del panel acústico como el material de referencia para la evaluación y posterior selección.

En la Tabla 2 se encuentra una breve descripción de las características técnicas de cada material, donde se incluyen: peso específico, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, dureza, temperatura de fusión, conductividad térmica y alargamiento a rotura.

Tabla 2: Características técnicas de las alternativas de material (DELMETAL, 2018; Eco Deck, 2012; Madecentro, 2018; NKS, 2018; Sears, Zemansky, Young, & Freedman, 2004; Smith & Hashemi, 2014; SOLTECO S. L., 2016, 2017)

Propiedades técnicas	**Unidades**	**Alternativas de material**					
		Acero	Acero Inoxidable 304	Aluminio 6063	PVC	Polipropileno	Madera Plástica (WPC)
Peso específico	g/cm^3	7.8	7.9	2.7	1.49 - 1.58	0.90 - 0.91	1.25
Resistencia a tracción	MPa	690	580	15.5	5.5	3	45.4
Módulo de elasticidad	MPa	205000	193000	69000	3100	2250	3475
Dureza	Brinell (B) Rockwell (HRB o HRR)	95 (B)	92 (HRB)	60 (B)	99 (HRR)	92 (HRR)	106 (HRR)
Temperatura de fusión	° C	1375	1400	660	227	176	150
Conductividad térmica	W/m.K	50.2	15	205	0.16	0.19	0.17
Alargamiento a rotura	%	14	55	8	20	600	800

Una vez consideradas las propiedades de cada uno de los materiales se realiza una comparación haciendo uso de una matriz de PUGH (Ulrich & Eppinger, 2004) con el fin de notar si hay diferencias importantes respecto a las características intrínsecas que puedan influir en la decisión del material para la estructura del panel acústico.

2.3 Calificación de las alternativas

Para calificar las propiedades de las alternativas de material frente a los requerimientos se utilizó una matriz de PUGH, mediante la cual se realiza una comparación cualitativa de las alternativas de material en base a sus características intrínsecas.

Para ejecutar la matriz de PUGH se tomó como material de referencia el acero debido a que fue el material utilizado en la versión previa del panel acústico, por lo que todos los requerimientos se evalúan en cero y, a partir de ahí, se realizaron las calificaciones respectivas de los demás materiales asignando un "+" si el comportamiento del material a ese requerimiento es mejor que el del acero, un "0" si es igual y un "-" si es peor.

	Alternativas de material					
Criterios de selección	Acero	Acero Inoxidable 302	Aluminio 6063	PVC	Polipropileno (PP)	Madera Plástica (WPC)
Lavable	0	+	+	+	+	+
Portable	0	0	+	+	+	+
Seguro	0	0	0	-	-	-
No inflamable	0	+	0	0	0	-
Fácil de construir	0	0	-	-	-	0
Suma +	0	2	2	2	2	2
Suma 0	5	3	2	1	1	1
Sumar -	0	0	1	2	2	2
Puntuación neta	0	2	1	0	0	0

Fig. 3. Matriz PUGH

En la Fig. 3 se presenta la matriz de PUGH desarrollada, en la cual se observa que las alternativas de material tienen un comportamiento técnico igual o ligeramente mejor que el del acero. En este orden de ideas es necesario definir unos criterios de selección que permitan considerar factores adicionales para seleccionar el material más adecuado para la estructura del panel acústico.

2.4 Determinación de los criterios de selección

Como ya se consideraron las características y propiedades técnicas de las alternativas de material para la estructura del panel acústico y dado que todas las alternativas cumplen con los requerimientos, fue necesario considerar factores adicionales a los que brinda el contexto hospitalario, con el interés de establecer unos parámetros que diferencien las condiciones de los materiales opcionados para la estructura del panel.
En este orden de ideas se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

2.4.1 Mantenimiento

El tema de mantenimiento hace referencia a la limpieza del panel acústico, el cual, acotado por las condiciones del ambiente hospitalario debe poder ser sometido al efecto de diferentes agentes químicos de tipo detergente/desinfectante sin causar desgaste o corrosión al material estructural (Ministerio de salud y protección social, 2014). Es por esto que fue fundamental considerar el comportamiento que presenta cada una de las alternativas de material frente a diferentes tipos de alcoholes, productos clorados, formaldehído, glutaraldehído, entre otros, ya que esto permitió evaluar las condiciones de lavado y la facilidad de uso de cada material en el entorno hospitalario (Molina T. & García Z., 2003).

En este criterio también se tuvo en cuenta la resistencia a la corrosión, puesto que es una variable determinante para que el panel acústico forme parte del mobiliario hospitalario de forma segura y no favorezca la proliferación de microorganismos en su interior, lo cual a su vez presenta una estrecha relación con las infecciones intrahospitalarias (Sousa Combe, 2012).

2.4.2 Propiedades técnicas del material

Para este criterio se utilizó el resultado obtenido en la matriz de PUGH, en la cual se consideraron netamente los parámetros técnicos de cada una de las alternativas de material desde la parte mecánica, física, química y térmica (Smith & Hashemi, 2014).

2.4.3 Proceso de manufactura

Este criterio incluyó todo el tema asociado a la construcción del panel acústico, considerando todos los procesos requeridos para lograr la estructura del panel desde la compra de cada material; esto incluye: corte del material, ensamble de las partes, sistema de articulación de los cuerpos, instalación de accesorios complementarios, entre otros (Smith & Hashemi, 2014).

2.4.4 Costo

Para este criterio se tuvo en cuenta el costo del material respecto a las ventajas ofrecidas por este.

2.4.5 Disponibilidad

Este criterio hace referencia a la posibilidad de acceder al material y los costos asociados que

implica la importación de los mismos en caso de no disponer de ellos a nivel regional o nacional.

2.4.6 Consideraciones medioambientales

Se consideró principalmente cómo es el tema de la disposición final de la estructura del panel una vez este haya cumplido su ciclo de vida. Para esto, se tiene en cuenta si el material puede ser reciclado o reutilizado mediante tratamientos químicos, físicos o térmicos (Smith & Hashemi, 2014).

A partir de esta descripción, se realiza una evaluación de los materiales opcionados con el fin de seleccionar aquel que tenga un mejor desempeño frente a los criterios establecidos.

2.5 Evaluación de las alternativas de material

Para realizar la evaluación y selección del material, se utilizó una matriz de evaluación de conceptos (Ulrich & Eppinger, 2004). En esta se consideran los criterios de selección definidos en la etapa previa y, se les asigna un peso porcentual de acuerdo con la importancia que tienen respecto al contexto de la problemática. Así, el criterio de mantenimiento asociado al tema de lavado recibe el mayor peso porcentual debido que es el parámetro de mayor importancia para el entorno hospitalario (Organización Mundial de la Salud, 2002).

Para la calificación se utilizó una escala de desempeño relativo (ver Tabla 3), en la cual se tomó nuevamente como referencia el desempeño del acero frente a cada uno de los criterios de selección y, a partir de ahí se determinó si cada una de las demás alternativas de material presentaba mejor, igual o peor desempeño que la referencia (Ulrich & Eppinger, 2004).

Tabla 3: Escala de desempeño relativo (Ulrich & Eppinger, 2004)

Desempeño relativo	Calificación
Mucho peor que la referencia	1
Peor que la referencia	2
Igual que la referencia	3
Mejor que la referencia	4
Mucho mejor que la referencia	5

Para comenzar a completar la matriz de evaluación de concepto, se asignó una calificación de 3 para el acero en cada criterio de selección, y posteriormente se asignaron las calificaciones de los otros 5 materiales. Finalmente se hizo la ponderación de cada criterio de selección y se obtuvieron las puntuaciones totales para cada uno de los materiales, como se puede ver en la Fig. 4.

Con esto, se observó que la mayor puntuación total la recibió el aluminio 6063, ya que presenta condiciones destacadas frente a: mantenimiento, características técnicas, proceso de manufactura, consideraciones medioambientales y disponibilidad en el mercado.

En este orden de ideas, el material más adecuado para la estructura del panel acústico con aplicación en el sector hospitalario, de acuerdo con el proceso de selección que se realizó es el aluminio 6063.

		Alternativas de material											
		Acero		Acero Inoxidable 304		Aluminio 6063		PVC		Polipropileno (PP)		Madera Plástica(WPC)	
Criterios de selección	Peso	Calificación	Puntuación ponderada	Calificación	Puntuación ponderada	Calificación	Puntuación ponderada	Calificación	Puntuación ponderada	Calificación	Puntuación ponderada	Calificación	Puntuación ponderada
Mantenimiento	30%	3	0.9	5	1.5	5	1.5	5	1.5	4	1.2	5	1.5
Caracteristicas técnicas	15%	3	0.45	4	0.6	4	0.6	1	0.15	2	0.3	2	0.3
Proceso de manufactura	15%	3	0.45	2	0.3	4	0.6	3	0.45	2	0.3	2	0.3
Costo	15%	3	0.45	2	0.3	2	0.3	5	0.75	5	0.75	2	0.3
Consideraciones medioambientales	15%	3	0.45	3	0.45	4	0.6	2	0.3	1	0.15	5	0.75
Disponibilidad	10%	3	0.3	3	0.3	5	0.5	2	0.2	3	0.3	2	0.2
Puntuación total		3		3.45		4.1		3.35		3		3.35	

Fig. 3. Matriz de evaluación de materiales.

3. RESULTADOS

Al realizar todo el proceso de selección del material presentado en la metodología se eligió el aluminio 6063 como el material que mejor desempeño presenta frente a las características y a los requerimientos que implica la utilización del panel acústico en el ambiente hospitalario.

El mayor reto que presentaba el problema era ofrecer una estructura estable y portable que permitiera el uso de productos químicos para realizar procedimientos de lavado y desinfección. Estas dos características se abordaron tanto en los requerimientos como en los criterios de selección y se ven reflejados en el aluminio 6063. La estabilidad y portabilidad del panel están relacionadas con el peso específico del material (2.7 g/cm^3), ya que al ser menor que el del acero (7.8 g/cm^3) hace que la estructura sea más liviana para facilitar su transporte pero sin comprometer su estabilidad.

Igualmente, el aluminio 6063 presenta buena resistencia a diferentes agentes químicos como los que se utilizan para el lavado de esta indumentaria y no se corroe ya que presenta una capa superficial de óxido de aluminio que lo protege de agentes externos (Madecentro, 2018).

Por otra parte, el aluminio 6063 es un material que presenta una rugosidad máxima de 0.06 mm (DELMETAL, 2018), lo que implica que se pueden lograr acabados superficiales lisos en la estructura del panel para evitar la acumulación de material particulado en la estructura.

Otra condición que es importante destacar es que el aluminio 6063 es un material abundante en el mercado y hay disponibilidad de diferentes tipos de perfiles comerciales por lo que se puede adaptar el material a las necesidades del diseño del panel acústico. Adicionalmente, este material permite el uso de herramientas estándar y complementos estructurales comerciales, lo que hace que la construcción del panel acústico sea simple.

Finalmente, el aluminio es un material que permite en su disposición final la posibilidad de fundirlo, inyectarlo, maquinarlo, laminarlo, forjarlo, extruirlo, y soldarlo para ser reciclado y utilizado, por ejemplo, en la fabricación de componentes para la industria electrónica (Madecentro, 2018).

4. CONCLUSIONES

Si bien un proceso de diseño debe estar limitado por los requerimientos del contexto que ofrece la problemática, también es importante que la selección de cada material que compone un producto esté impregnada por los mismos requerimientos pero con ligeras adaptaciones que involucren las características técnicas del material según las necesidades del ambiente donde se va a utilizar el producto.

En este caso, el ambiente hospitalario tiene una fuerte restricción en tema de limpieza y características asociadas, lo cual disminuye las opciones de materiales que se pueden implementar para la construcción del diseño planteado para el panel acústico.

REFERENCIAS

DATECSA. (2017). Soluciones Acústicas. Retrieved November 27, 2017, from http://www.datecsa.com.co/soluciones/soluciones-acusticas/

DELMETAL. (2018). *Aluminio 6063*. Retrieved from http://www.delmetal.com.ar/productos/aluminio/6063.pdf

Eco Deck. (2012). *ECO DECK: living the decking experience*.

FIBERGLASS ISOVER. (2018). Soluciones para Auditorios, Cinemas y Estudios de Grabación. Retrieved September 22, 2018, from https://www.isover.com.co/soluciones-para-auditorios-cinemas-y-estudios-de-grabacion

Madecentro. (2018). *Ficha técnica Aluminio*. Retrieved from https://www.madecentro.com/media/ficha-tecnica/aluminio.pdf

Marcos, F. V., & Pulgarín, I. G. (2005). Calidad ambiental interior: Bienestar, confort y salud. *Revista Espanola de Salud Publica*, *79*(2), 243–251. http://doi.org/10.1590/S1135-57272005000200011

Ministerio de salud y protección social. (2014). Resolución 2003 de 2014. República de Colombia.

Ministerio de Salud y Protección social. (2018). Seguridad del paciente. Retrieved January 22, 2018, from https://www.minsalud.gov.co/salud/CAS/Paginas/seguridad-del-paciente.aspx

Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Resolución 2400 de 1979 (1979). Retrieved from http://www.indumil.gov.co/doc/normas gestion integral/Resoluciones/res2400_1979.pdf

Molina T., R., & García Z., O. (2003). *Manual De Limpieza y Desinfección Hospitalaria*. Retrieved from http://intranet.esecarmenemiliaospina.gov.co/images/calidad/mapa3/5 Intervencion Comunitaria/2 Subprocesos/1 Deteccion Temprana y Proteccion Especifica/2 Manuales/EIC-S1M2-V2Manual_Limp_Desinfe.pdf

NKS. (2018). Acero inoxidable 304 y 304L. Retrieved September 23, 2018, from https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-304/

Organización Mundial de la Salud. (2002). Prevención de las infecciones nosocomiales: guía práctica. *Guia Practica*, *2*, 70. http://doi.org/10.1590/S0036-36341999000700012

Restrepo Diaz, M. C. (2002). El Ruido. Un Contaminante Del Medio Ambiente Y Sus Efectos Sobre La Salud Humana. *Revista Estomatologia*, *10*(1), 1–59.

Rivera-Vega, M. del P., Galeano-Upegui, B. J., Escobar-Mora, N. J., & Patiño-M., E. (2015). El proceso de diseño de una barrera acústica aplicado al sector hospitalario. *Revista Ingeniería Biomédica*, *9*(18), 133–138. http://doi.org/2015.9.18.133-138

Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., & Freedman, R. A. (2004). *Física Universitaria* (Décimo pri). México: Pearson Educación.

Smith, W., & Hashemi, J. (2014). *Fundamentos de la ciencia e ingenieria de materiales*. México: McGraw-Hill. Retrieved from https://chirinossilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicic3b3n-william-f-smith-javad-hashemi.pdf

SOLTECO S. L. (2016). *Ficha técnica material plástico reciclado*. España.

SOLTECO S. L. (2017). *Ficha técnica: Material plástico reciclado*. España.

Sousa Combe, L. M. (2012). La limpieza en hospitales : un compromiso institucional. *Hospitalidad ESDAI*, 27–48.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2004). *Diseño y desarrollo de productos. Enfoque multidisciplinario* (Tercera ed). Mexico: McGraw-Hill Interamericana.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

MONTAJE DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA CAPTURAR IMÁGENES DE DESGASTE EN HERRAMIENTAS DE CORTE

ASSEMBLY OF AN ARTIFICIAL VISION SYSTEM TO CAPTURE WEAR IMAGES IN CUTTING TOOLS

Dra. Luz Karime Hernández Gegen[*], M.Sc. Edison Martínez Oviedo[*]
Ing. José Humberto Arévalo [**]

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica Grupo GIMUP.
Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
0057-3138932408, 0057-3112644348.
e-mail: lukahege@hotmail.com; edisonmartinez@unipamplona.edu.co
[**] **Universidad Francisco de Paula Santander,** Facultad de Ingenierías, Programa de ingeniería Mecánica, Grupo GITYD
Vía Acolsure, Sede Algodonal, Ocaña, Colombia, Ocaña, Norte de Santander, Colombia.
5690088 Fax: Ext. 104, 0057 3182335004.
e-mail: jharevalor@ufpso.edu.co.

Resumen: En este trabajo se someterá a evaluación, la normativa ISO 8688-1 que rige el criterio de desgaste de herramientas. Existen varias maneras de observar o determinar el estado de vida de la herramienta, en este caso particular se determinará la vida útil de la herramienta de corte por medio de tratamientos de imágenes, obtenidas por un electro-microscopio, realizando un montaje minucioso para la obtención de las mismas. En esta publicación se especifican los detalles del montaje de sistema de visión para la captura de las imágenes.

Palabras clave: Desgaste, norma ISO 8688-1, tratamiento de imágenes.

Abstract: In this work, the ISO 8688-1 standard that governs the tool wear criterion will be subjected to evaluation. There are several ways to observe or determine the state of life of the tool, in this particular case the life of the cutting tool will be determined by means of image treatments, obtained by an electro-microscope, making a meticulous assembly to obtain from the same. This publication specifies the details of the vision system assembly for capturing the images.

Keywords: wear, ISO 8688-1 standard, Image processing.

1. INTRODUCCIÓN

La extensión de la vida útil de las herramientas de corte utilizadas en procesos de arranque de material, suponen un ahorro relevante en cuanto a los tiempos y costos de producción. Los tiempos muertos en el mecanizado, en especial los vinculados con el cambio de herramientas representan un porcentaje significativo en las paradas de máquinas, las cuales no siempre son necesarias pues su vida útil aún puede estar vigente. La importancia de la vida útil se extiende

en diversos estudios de los que se destacan el de Attanasio et al. (Attanasio, Ceretti, Fiorentino, Cappellini, & Giardini, 2010), quienes aseguran que el desgaste de la herramienta afecta la vida útil, la cantidad de sustituciones de herramientas, calidad de productos en términos de rugosidad, precisión geométrica y estado de tensión residual. Así mismo, Bin Li (Li, 2012), afirma que es esencial comprender el proceso de mecanizado de material para seleccionar el material de la herramienta, garantizar una precisión dimensional y la integridad de la superficie del producto terminado.

Existen dos maneras de mirar el estado de vida de la herramienta y tomar la decisión si se cambia o todavía es útil; una de ellas hace referencia a la destreza que tenga el operario en identificar este estado, otra opción, es según la normativa ISO 8688-1 donde se estipulan unos criterios de desgaste para establecer si la herramienta es útil o no. Sin embargo, se ha demostrado que se puede reducir el tiempo de inactividad causado por errores tecnológicos y humanos en un 75% y aumentar la eficiencia de producción en un 10 a 50% con una tecnología confiable de monitoreo de desgaste (Ko, Cho, & Jung, 1995).

Para el uso de la norma ISO se requiere de un sistema de monitoreo que evalué el estado de la herramienta. Estos sistemas de monitoreo están divididos en dos métodos de medida, directos e indirectos. Los métodos directos son los más exactos a la hora de evaluar el desgaste, aunque no los más utilizados puesto que en la mayoría requiere la extracción de la herramienta y su medida en dispositivos adecuados. Los métodos indirectos son más utilizados por su sencillez y facilidad de lectura, implican la medida de desgaste a través de variables intermedias como fuerzas, temperatura, vibraciones, o potencia consumida (Gegen, 2007) (L. Wang, 2006).

Siguiendo el modelo directo de medida para evaluar el desgaste, se encuentra el uso de sistemas de visión artificial, objeto de este estudio. Las técnicas de procesamiento de imágenes digitales son útiles para la detección sencilla y rápida de varios tipos de desgaste de herramientas. Estos algoritmos de procesamiento de imágenes se pueden usar para mejorar la capacidad de automatización en centros de mecanizado (Dutta, Pal, Mukhopadhyay, & Sen, 2013). Este tipo de sistema se utiliza comúnmente para medir el desgaste en la cara de la herramienta conocido como desgaste de flanco, y el desgaste en la cara de inclinación conocido como desgaste de cráter (Kassim, Mannan, & Mian, 2007). Es por esto que diversos estudios investigaron esta metodología como es el caso de Yiquan Dai & Kunpeng Zhu (Dai & Zhu, 2018), quienes presentaron una configuración novedosa de un sistema de visión artificial, usando una inspección automática del desgaste progresivo en la máquina de mecanizado. El propósito de este modelo era mejorar la calidad final de la pieza manufacturada y extender la vida útil de la herramienta en procesos de micro fabricación. Por otra parte T. Mikołajczyk et al. (Mikołajczyk, Nowicki, Bustillo, & Yu Pimenov, 2018), utilizan un software de predicción de vida útil de la herramienta para operaciones de torneado, alimentado por datos obtenidos con redes neuronales y el reconocimiento de imágenes. Este sistema presenta un error ligeramente mayor que las mediciones directas, sin embargo, cumple con los requisitos industriales. Chen Zhang & Jilin Zhang (Zhang & Zhang, 2013), Investigaron un método de medición de desgaste de herramienta basado en visión artificial en el proceso de fresado. En su trabajo proporcionan el modelo detallado del método para la estimación del desgaste, demostrando que este proceso se puede utilizar con éxito.

Tras diversos estudios sobre análisis de modelos de visión artificial, se ha decidido enfocar esta publicación en detallar las condiciones mínimas que requieren un sistema de visión, esto con el propósito de capturar imágenes de desgaste de herramientas que permitan un exitoso procesamiento.

2. FASE EXPERIMENTAL

Para observar la mella dejada por el desbaste realizado por la herramienta de corte de fresado se requieren equipos y posiciones específicas. Las diferentes imágenes a ser capturadas deben mantener ciertas condiciones en común con el fin de hacer más fácil su procesamiento. Entre esas condiciones es prioritaria la escala y la posición de cada una de las tomas. Estos dos parámetros deben

mantenerse constantes con el propósito que el post-procesamiento de la imagen sea más sencillo y la información a obtener más fiable.

Para esta captura se utilizó un electro-microscopio marca OPTIKA como el mostrado en la *Fig.1*, al cual se le instalo una cámara de 30mm UHCCD marca SONY (ver *Fig.1.* ***Electro-Microscopio óptico SMZ 800*** *)* para obtener una mejor resolución de las imágenes. Las características técnicas se indican en la ***Error! Reference source not found.***.



Fig.1. Electro-Microscopio óptico SMZ 800



Fig. 2. Cámara UHCCD marca SONY

Tabla 1: Especificaciones técnicas cámara UHCCD marca Sony

Características	Especificaciones
Temperatura de funcionamiento (en Centígrados)	-10 ~ 50
Humedad de funcionamiento	30 ~ 80% RH
fuente de Alimentación	DC 5 V en el Puerto USB DEL PC
Sistema operativo	Microsoft ® Windows ® XP/Vista/7/8 (32 y 64 bits) os x (Mac OS X) Linux
Requisitos del PC	CPU: Igual a Intel Core2 2.8 GHz o Superior memoria: 2 GB o Más Puerto USB: USB $ NUMBER Puerto de Alta velocidad pantalla: 17 " o Más Grande CD-ROM

Uno de los inconvenientes, al momento de sujeción del inserto fue su posición con respecto al electro-microscopio ya que el ángulo requerido entre los dos es de 90 grados, para la toma de las imágenes. El equipo no cuenta con un sistema de sujeción adecuado para este caso en particular debido a la geometría del inserto. Por tal razón, fue necesario la creación de un dispositivo de sujeción para la herramienta de corte, el cual permitiera mantener de forma sencilla la misma posición, facilitando el cambio de la herramienta y múltiples capturas. Este dispositivo fue diseñado en un CAD, (SolidWorks), y construido en polietileno por una máquina 3D, el diseño es el mostrado en la Fig.3.

Una de las ventajas de este diseño, es la toma de las imágenes ya que la herramienta de corte permanece en el mismo sitio a la hora de la captura.

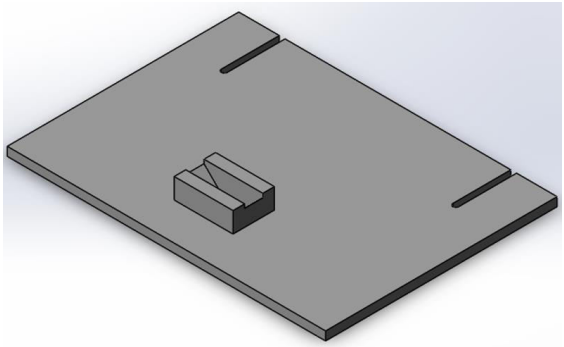


Fig.3. Sistema de fijación del inserto

Una vez colocado el dispositivo, en el electro-microscopio, se pasó a la etapa de captura de las imágenes. Estas imágenes no eran las adecuadas al momento de tratarlas en Matlab, debido al contraste producido por la iluminación en el inserto, ya que en ciertas ocasiones la nitidez alrededor de la mella era desfavorable. Por tal motivo, se instalaron dos lamparas led alrededor del equipo, para proporcionar un mejor tono de lumen y una mejor visualización del inserto. *Fig. 4,* las características técnicas de las lamparas se indican en la *Tabla 2*. Estas lámparas fueron ubicadas en una posición estratégica, en cuanto al ángulo con respecto al electro-microscopio, ya que de ello dependía el contraste de la imagen, reduciendo los brillos y tonos oscuros en la herramienta de corte. El ángulo requerido en cada una de las lámparas es de 45 grados, respecto al microscopio.

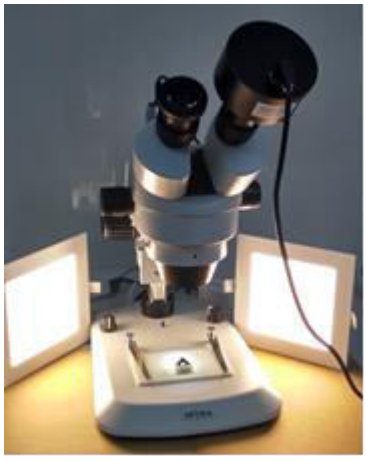


Fig. 4. Instalación de lamparas LED.

Tabla 2: Especificaciones técnicas lamparas LED

Característica	Especificaciones
Potencia nominal	12 W
Tensión nominal	110-220 V
Frecuencia nominal	50-60 HZ
Corriente nominal	280 mA
Lumen de flujo	≥ 1100 Lúmenes
Lumen (de flujo)	≥ 90 %
Factor de potencia (PF)	≥ 0.85

Para cada recorrido se requirió la toma de 7 imágenes, ya que la fresa pose dicha cantidad de insertos. Para la obtención de las imágenes, por la cámara UHCCD fue necesario instalar el software ToupView de dicho dispositivo para la interfax entre el pc, donde se almacenaron las imágenes a tratar. El programa de tratamiento de imágenes fue realizado en Matlab, determinando el desgaste de la mella.

Dado que el procesamiento se realiza por archivos, se requiere que la captura de las imágenes sea en la misma posición y con las mimas características (iluminación, resolución, contraste y posición), para cada una de las imágenes, y no incurrir en posiciones erróneas a la hora de tratarlas, y dar el concepto más cercano de desgaste de la mella. La *Fig. 4* muestra el montaje definitivo de todo el sistema de captura, lo cual permite tomar imágenes que brinden las condiciones aptas para un post-procesamiento.

3. RESULTADOS

Se logró obtener el ángulo adecuado en el montaje de la placa del cual depende la buena calidad en el momento de capturar las imágenes, con la ayuda del dispositivo se observó la mella con buena nitidez. *Fig.* ***5***. En el primer recorrido de la herramienta de corte por el tocho se observó que la iluminación no varió en cada toma realizada en el proceso de desgate del inserto. *Fig. 6.*

En cada etapa del proceso de desbaste, fue tomada la imagen para cada inserto, y así poder realizar su segmentación y tratado en Matlab, llegando a dar un resultado de desgaste, dejado por la mella.

Cada valor obtenido de desgaste producido por la mella fue tratado de acuerdo con el programa diseñado en Matlab, en comparación con el inserto patrón, *Fig. 5.*

La *Fig. 6.* ***Imagen del inserto desgastado (inserto 1)*** muestra la imagen capturada sin el montaje adecuado sirviendo como punto de partida para cada una de las mejoras necesarias en el montaje. Comparece con la imagen de la *Fig. 5* para notar la variación en la nitidez.

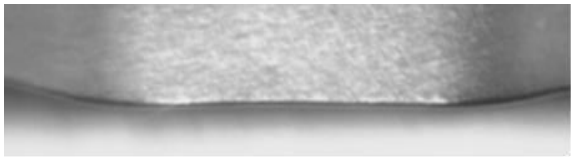


Fig. 5. Imagen del inserto patrón (inserto 1)

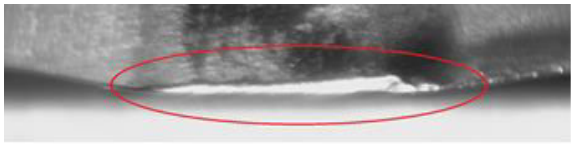


Fig. 6. Imagen del inserto desgastado (inserto 1)

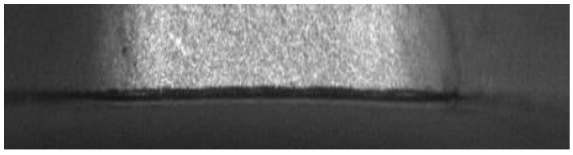


Fig. 7. Sin montaje adecuado

4. CONCLUSIONES

A través de las imágenes obtenidas por el electro-microscopio, se puede concluir, que se requiere de un sistema de fijación del inserto, en donde cada captura realizada no varíe, con respecto a la imagen patrón.

En cuanto a la iluminaria se precisa agregar luz de manera que no afecte las imágenes debido a los brillos reflejados en la herramienta de corte y los tonos oscuros producidos por el sistema de luz dado por el equipo. Las iluminarias fueron colocadas en una posición el cual con la luz emitida por el electro-microscopio reflejara en el inserto una adecuada iluminación a la hora de la captura de las imágenes.

Para una mejor resolución de cada imagen tomada por el electro-microscopio, se instaló una cámara digital donde la captura fuera realizada no directamente con el equipo (electro-microscopio), si no con otro dispositivo (pc), para que no se incurriera en movimientos en el inserto, o se variaran parámetros del equipo, produciendo tomas erróneas que conlleven a un valor del desgaste equivocado de la herramienta de corte.

RECONOCIMIENTO

El autor agradece a la Universidad Francisco de Paula Santander, por el apoyo brindado por esta investigación.

REFERENCIAS

Attanasio, A., Ceretti, E., Fiorentino, A., Cappellini, C., & Giardini, C. (2010). Investigation and FEM-based simulation of tool wear in turning operations with uncoated carbide tools. *Wear*, *269*(5-6), 344-350. https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.013

Dai, Y., & Zhu, K. (2018). A machine vision system for micro-milling tool condition monitoring. *Precision Engineering*, *52*(December 2017), 183-191. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.12.006

Dutta, S., Pal, S. K., Mukhopadhyay, S., & Sen, R. (2013). Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *6*(3), 212-232. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.005

L. K. H. GEGEN, «Propuesta de nuevos criterios de vida de herramienta de corte y determinación del desgaste a partir de la clasificación de imágenes digitales caracterizadas utilizando descriptores de región simples y basados en momentos .,» ciudad de leon, 2007.

Kassim, A. A., Mannan, M. A., & Mian, Z. (2007). Texture analysis methods for tool condition

monitoring. *Image and Vision Computing*, *25*(7), 1080-1090. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2006.05.024

Ko, T. J., Cho, D. W., & Jung, M. Y. (1995). On-line monitoring of tool breakage in face milling using a self-organized neural network. *Journal of Manufacturing Systems*, *14*(2), 80-90. https://doi.org/10.1016/0278-6125(95)98889-E

L. Wang, R. G. (2006). monitoring , an important area of manufacturing engineering. *Springer Series in Advanced Manufacturing*, *49*(0), 6221.

Li, B. (2012). A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *35*, 143-151. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.05.006

Mikołajczyk, T., Nowicki, K., Bustillo, A., & Yu Pimenov, D. (2018). Predicting tool life in turning operations using neural networks and image processing. *Mechanical Systems and Signal Processing*. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.022

Zhang, C., & Zhang, J. (2013). On-line tool wear measurement for ball-end milling cutter based on machine vision. *Computers in Industry*, *64*(6), 708-719. https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.03.010

REVIEW, FIBRAS NATURALES COMO ALTERNATIVA DE REFUERZO EN MATERIALES COMPUESTOS

Msc.William Javier Mora Espinosa* **Dr. Bladimir Azdrubal Ramón Valencia* Dr. Gonzalo G. Moreno Contreras**

* **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y arquitectura, Grupo de Investigación GIMUP.
Km1 via Bucaramanga, ciudadela universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
(0375)685303
E-mail: william.mora2@unipamplona.edu.co, hbladimir@unipamplona.edu.co,

Resumen: Actualmente, existe la necesidad en todo el mundo, de crear nuevos materiales que sean amigables con el medio ambiente, para ser reemplazados por aquellos en donde la naturaleza requiere de tiempos de descomposición elevados. En este contexto, las fibras naturales se presentan como una alternativa de material para el consumo en la fabricación de partes industriales, principalmente por su bajo costo, menor peso y un consumo de energía inferior durante la fase producción, frente a las fibras sintéticas. Por tanto, en el siguiente documento se presenta una revisión, sobre las propiedades más relevantes de las fibras naturales para utilizadas como refuerzo en materiales compuestos. Se destaca inicialmente la estructura y clasificación de las fibras lignocelulosicas, luego las principales propiedades que se pueden determinar, posteriormente se concentra el estudio en las propiedades mecánicas, térmicas y morfológicas, plasmando los resultados obtenidos por diversos autores alrededor del mundo. Finalmente se hace una discusión sobre los resultados y las implicaciones de los mismos en la selección de la matriz polimérica y el proceso de fabricación de materiales compuestos.

Palabras clave: Materiales compuestos, resistencia mecánica, estabilidad térmica, morfología.

Abstract: Currently, there is a need throughout the world to create new materials that are friendly to the environment, to be replaced by those where nature requires high decomposition times. In this context, natural fibers are presented as an alternative material for consumption in the manufacture of industrial parts, mainly due to their low cost, lower weight and lower energy consumption during the production phase, compared to synthetic fibers. Therefore, the following document presents a review on the most relevant properties of natural fibers for use as reinforcement in composite materials. The structure is initially highlighted, then the main properties that can be determined, then the study focuses on the mechanical, thermal and morphological properties, capturing the results obtained by various authors around the world. Finally a discussion is made about the results and their implications in the selection of the polymer matrix and the composite materials manufacturing process.

Keywords: Composite materials, mechanical resistance, thermal stability, morphology.

1. INTRODUCCIÓN

La busqueda permanente de nuevos materiales amigables con el medio ambiente se fundamenta en la necesidad de reemplazar materiales obtenidos de recursos no renovables, que se caracterizan por su significativa huella de carbono y largos periodos de degradación (Wambua, Ivens, & Verpoest, 2003). Esta conciencia ambiental, en las diversas líneas de producción, se ha concentrado en la busqueda de matrices y refuerzos de tipo orgánico para la fabricación de materiales compuestos de tipo "bio", que garanticen las mismas propiedades mecánicas de los materiales convencionales (Faruk, Bledzki, Fink, & Sain, 2012).

Diversas fibras naturales vegetales o lignocelulosicas han sido evaluadas como refuerzo aprovechando su diversidad botanica, clasificandolas en fibras de líber (tejido leñoso), fibras de hoja, fibras de semilla (fibra, grano, cascara, fruta y corteza), fibras de núcleo, fibras de cañas y hierva, así como otros tipos de fibras (madera, raíces, etc.) (Pickering K et al., 2008).

Las multiples investigaciones desarrolladas, muestran que las fibras naturales tienen un gran potencial como refuerzo, tanto en matrices de base biológica como de base sintética, con propiedades como: resistencia mecánica, alto módulo específico, densidad, bajo peso, estabilidad térmica, bajo costo, menor requerimiento de energía, menor desgaste en el procesamiento, amplia disponibilidad, excelente biodegradabilidad, y resistencia a la deforestación (Saba, Jawaid, Alothman, & Paridah, 2016).

Sin embargo, hay varios retos que enfrentan las fibras naturales para ser utiles como refuerzo en biocompuestos, debido a su carácter hidrófilo, y en consecuencia se genera una adhesión débil en matrices hidrófobas. Por otro lado, su temperatura maxima de degradación oscila alrededor de los 200°C, limitando el uso de matrices con requerimientos de mayor temperatura.

Otros inconvenientes que presentan son la gran variabilidad en las propiedades mecánicas (Sydenstricker, Mochnaz, & Amico, 2003), (Eichhorn, y otros, 2001), menor resistencia a la rotura, inferior elongación, inconvenientes de flujo en la boquilla de máquinas de inyección y presencia de burbujas en el producto (Toriz, Denes, & Young, 2002).

A pesar de todos estos inconvenientes las fibras naturales siguen conservando la ventaja en factores determinantes como el bajo costo, la baja densidad, la menor abrasión a los equipos, menores irritaciones en la piel y vías respiratorias (Mukhtar, Leman, Ishak, & Zainudin, 2018) y la mejorada energía de recuperación (Mohanty, Misra, & Hinrichsen, 2000); ventajas que les han permitido seguir compitiendo con las fibras sintéticas.

A continuación se realiza una revisión de las diversas propiedades que tienen las fibras naturales y su relevancia en el proceso de selección de la matriz y el proceso de fabricación.

2. FIBRAS NATURALES VEGETALES

Las fibras naturales se clasifican como materiales lignocelulósicos, ya que están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, así como pequeños porcentajes de pectina y otros compuestos orgánicos de bajo peso molecular (extraíbles), que son de naturaleza polimérica; la celulosa está compuesta de moléculas lineales (polisacárido cristalino) sin ramificaciones, la hemicelulosa es celulosa ramificada de bajo peso molecular, la lignina es un complejo co-polímero amorfo de tipo aromático y la pectina un heteropolisacárido (Sarip, Hossain, Azemi, & Karim Allaf, 2016).

La resistencia y estabilidad estructural de la fibra la proporciona la celulosa que es el componente principal, pero el contenido depende de cada tipo de fibra (Francucci & Rodriguez, 2014). La figura1 muestra la estructura común de las fibras naturales lignocelulosicas.

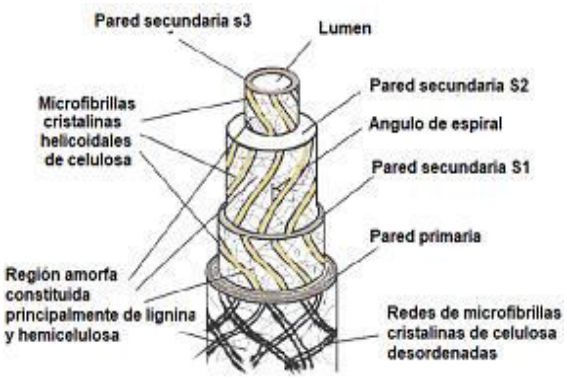


Figura 1. Estructura de una fibra natural (Rong, Zhang, Liu, Yang, & Zeng, 2001)

3. PROPIEDADES DE LAS FIBRAS

Las principales propiedades de las fibras naturales son de tipo geométrico, mecánico, térmico, morfológico, físico, químico, eléctrico, entre otras. (Müssig, Fischer., Graupner, & Drieling, 2010).

Diversos autores han utilizado principalmente tres para evaluar la viabilidad de una fibra como refuerzo en un material compuesto, estas son: las propiedades mecánicas, la estabilidad térmica y la morfología; a continuación, se presentan algunos de los resultados más significativos en las propiedades mecánicas, térmicas y morfológicas de una muestra representativa de fibras naturales utilizadas como refuerzo en biocompuestos

3.1. Propiedades mecánicas.

La resistencia varía en todas las fibras naturales lignocelulósicas debido a su estructura formada por micro-fibrillas de celulosa acopladas dentro de una matriz amorfa de lignina y hemi-celulosa que se distribuyen a lo largo de la longitud de la fibra, cada fibrilla tiene una compleja estructura estratificada, con una delgada pared primaria que rodea una capa más gruesa y secundaria. (Mohan Rao & Mohana Rao, 2007).

Las microfibrillas de celulosa son las responsables de la resistencia a la tracción y el ángulo en espiral de la estructura afecta las propiedades mecánicas debido a su comportamiento altamente anisotrópico (Gindl W. et al, 2006). Las propiedades son más altas cuándo las microfibrillas de celulosa están orientadas a llargo del eje de la tensión (Tomczak, Sydenstricker, & Satyanarayana, 2007). Generalmente la resistencia a la tracción de los compuestos de polímeros reforzados con fibra natural aumenta gradualmente con el contenido de fibra, hasta un tope máximo que varía según el tipo de matriz, a partir de este punto su resistencia disminuye, aunque el módulo de Young se incremente al aumentar la carga de fibra (Arpitha & Yogesha, 2017). La tabla 1, presenta las propiedades mecánicas obtenidas en diversas fibras naturales.

Varios autores han investigado el comportamiento a tracción de las fibras naturales y se observan grandes discrepancias en los valores reportados para la resistencia y el módulo de Young en la literatura, esto debido a que las fibras naturales presentan generalmente secciones transversales variables e irregulares. Los principales errores de medición se presentan en el cálculo del esfuerzo y en valores como la longitud calibrada de la fibra, la velocidad de deformación, el método de agarre, la resolución de la célula de carga y la precisión del actuador, así como la metodología para medir el módulo de elasticidad (Alves F. M., Castro, Martins, Romildo., & Toledo, 2013).

En la determinación de las propiedades mecánicas se debe tener en cuenta que las fibras naturales de constitución similar, pueden tener diferentes valores de resistencia a la tracción debido al estado de alineación de las moléculas; estas, aunque sean químicamente casi idénticas, como el lino y algodón varían; para el primero la resistencia es de 800 a 1500 Mpa, mientras que para el algodón es de 400Mpa (Gordon C J, 2001).

De igual manera se ha encontrado gran variabilidad en la resistencia a la tracción incluso en estudios del mismo tipo de fibra; los mayores valores de resistencia obtenidos en estas investigaciones están en las fibras de bambú (503 MPa), jute (300-800 MPa), hoja de piña (413-1627 MPa), Vakka (549 MPa), lino (345-1500), cáñamo (345-1500 MPa), banana (529-759 MPa), Sansevieria Rifasciata (526-598 MPa), sea grass (453-692 MPa), ramio (400-1000 MPa), pineapple leaf fiber (180-1627 MPa), algodón (287-597 MPa), entre otras.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de diversas fibras naturales

Fibra	Esfuerzo a tensión (MPa)	Módulo de Young (GPa)	% Elongación	Referencia
Jute	393-800	10-30	1.5-1.8	
Sisal	227-400	9-20	2-14	
Pineapple leaf	413-1627	34.5-82.5	0.8-1	
Kenaf	250	4.3		
Red banana	482-567		30.6	(Sanjay, Madhu, Jawaid, Senthamaraikannan, & Senthil, 2018)
Nendran banana	407-505		28.3	
Vakka	549	15.85	3.46	
Abaca leaf fiber	418-486	12-13.8		
Alfa	35	22	5.8	
Tussah silk	248.7	5.8	33.5	
Nettle	650	38	1.7	
Flax	345-1500	27.6-8	1.2-3.2	
Hemp	550-900	70	1.6	
Banana	529-759	8.2	1-3.5	
Coir	108-252	4-6	15-40	
Root	157	6.2	3	
Palymyrah	180-215	7.4-60.4	7-15	
Date	309	11.3	2.7	
Bamboo	503	35.9	1.4	
Talipot	143-294	9.3-13	32.7-5	
Snake grass	278.8	9.7	2.7	
Elephantgrass	185	7.4	2.5	
Petiole bark	185	15	2.1	
Spatha	75.6	3.1	6	
Rachilla	61	2.8	8.1	
Rachis	73	2.5	13.5	
Coconut tree leafs heath	119.8	18	5.5	
Sansevieria Rifasciata	526-598	13.5-15-3		
Sansevieria cylindrica	585-676	0.2-11-2	11-14	
Palm	377	2.75	13.7	
Henequen	430-570	11.1-16-3	3.7-5-9	
Bagasse	290	11		
Curaua	158-729		5	
Sea grass	453-692	3.1-3.7	13-26-6	
Oil palm	80-248	0.5-3.2	17-25	
Piassava	134-143	1-4.6	7.8-21-9	
PALF	180-1627	1.4-82.5	1.6-14.5	
Ramie	400-1000	24.5-128	1.2-4	
Isora	500-600		5-6	
Hivernal	567-1655	48.4-95	1,1-2.3	(Sanjay, Madhu, Jawaid, Senthamaraikannan, & Senthil, 2018)
Alaska	462-1004	46,3-52.7	1,1-2.3	
Niagara	341-1141	28,9-62.3	1,1-2.3	
Oliver	438-1360	34,6-76,4	0.9-2.5	
Cotton	287-597	5.5-12.6	3-10	
Saharan aloe vera cactus leaves	621.8	40.3	2.47	
Prosopis Juliflora Bark	558		1.77	
Ferula	475.6	52.7	4.2	(Balaji & Nagarajan, 2017)
Sisal	511-635	9.4-22	2-2.5	
Napier Grass Fiber Strands	88.4	13.15	0.99	
Thespesia	573	61.2	0.79	
Juncus effesus	113	4.38	2.75	(Maache et al., 2017)
Sugar cane	169.5	5.18	6.25	(Hossain, y otros, 2014),
Areca	123.9	1.28	22.5	(Yusriah, Sapuan, Zainudin, & Mariatti, 2014)
Werregue	151.7-346.5	3.35-8.35	9.59-62.9	
Caña flecha	108.4-228	1.93-5.13	25,5-60,8	
Palma estera	59.8-149.6	1.33-3.73	313,27-48.87	(Mora & Ramón B.A., 2017)
Iraca	61.6-140.2	4,51-10,7	5,03-15.63	
Damagua	11.48-26.08	0,07-0.67	13.48-34.08	
Moriche	585,04	9.54	40,6	(Mora W. , 2017)
Cumare	220.5	6.4	24.39	(Mora. W.J. & Ramón. B.A., 2017)
Guaruma	92.5-197.1	1.23-3.63	24,2-50.2	
cabecinegro	9,9-25,5	0,6-2	13-17.8	(Mora W. , 2017)
esparto	81.9-235.9	1.82-4.42	11.37-22.77	
Fique	132.4	8.2-9.1	9.8	(Gómez, Guzmán, & Ramón, 2016)

Nuevas investigaciones están descubriendo permanentemente fibras con alta resistencia a la tracción. Las fibras de cáñamo, yute, lino y sisal están siendo usadas en la industria del automóvil (Faruk, Bledzki, Fink, & Sain, 2012).

Tres fibras colombianas estudiadas también presentan buen comportamiento a tracción, estas son cumare (220 MPa), werregue (151-346 MPa) (Mora. W.J. & Ramón. B.A., 2017) y moriche (585 MPa) (Mora W.J. ,2017).

3.2. Comportamiento térmico.

Las investigaciones sobre las propiedades térmicas de las fibras naturales se concentran en el análisis de cada cambio de pendiente en la curva del termograma temperatura vs pérdida de peso (TG); el comportamiento de la curva TG en todas las fibras es similar, la primera perdida de la masa es atribuida a la evaporización de la humedad generalmente en un rango de temperaturas de 25°C a 125°C (Abraham, y otros, 2011).

Una segunda región de pérdida de masa entre 200 a 550◦C, se asocia a la descomposición térmica de la celulosa, con presencia de unos picos endotérmicos, producto de la degradación de la pectina y la hemicelulosa en temperaturas por debajo de 325°C (Yao, Wu, Lei, Guo, & Xu, 2008).

Varios autores coinciden en que por encima de los 367°C se inicia la descomposición de lignina, que, al estar formada por una red compleja de anillos aromáticos con varias ramas, ocurre con una tasa de pérdida de peso muy baja desde la temperatura ambiente hasta valores superiores a 700 ◦C (De Rosa, y otros, 2011) (Fiore V. Valenza A. & Di Bella G., 2011) (Yang H. Yan R. Chen H. Lee D. F. & Zheng C., 2007).

Finalmente se volatiliza el carbón producto de la degradación de todos los componentes iniciales (Barneto A. G. Carmona J. A. Alfonso J. E. & Sánchez-Serrano R., 2010).

Al elaborar compuestos, el carácter hidrófilo de las fibras no permite la formación de uniones interfaciales fuertes con la matriz, dando como resultado una reducción en las propiedades mecánicas (Girisha & Srinivas, 2012). La humedad en las se ve afectada por variables como el proceso de extracción y secado, este porcentaje determinado por el tipo de tratamiento y el tiempo requerido para evaporar toda la humedad retenida y mejorar su adhesión.

La estabilidad térmica evaluada en diversas fibras naturales, generalmente alcanza a superar los 200°C, es decir, que inician su proceso de descomposición por encima de este valor. El límite de estabilidad obtenido por diversos autores para algunas fibras naturales se muestra en la tabla 2.

Esta temperatura influye en las condiciones del proceso de transformación en materiales compuestos usando fibra natural como refuerzo en matrices poliméricas. Un valor promedio para las fibras de 200°C, solo permite utilizar matrices termoplásticas o termoestables, en donde el proceso de fusión o curado este por debajo de este valor.

La presencia de humedad en las fibras naturales (carácter hidrófilo) es un factor que afecta su uso como refuerzo, debido al comportamiento hidrófobo de las resinas poliméricas y como consecuencia de este fenómeno la unión interfacial se ve disminuida, ocasionando una reducción en las propiedades mecánicas del compuesto (Girisha & Srinivas, 2012), (Miranda, Bica, Nachtigall, Rehman & Rosa, 2013).

Sin embargo, este inconveniente de absorción de humedad e hinchazón posterior de las fibras naturales se puede reducir mediante tratamientos químicos selectivos, mejorando las interacciones interfaciales fibra / matriz y dan como resultado un incremento considerable de las propiedades mecánicas en los compuestos. Las fibras también se han modificado utilizando métodos biológicos como la adición de nano fibras de celulosa y métodos físicos como el tratamiento con plasma. (Cruz & Fangueiro, 2016).

Tabla 2. Estabilidad térmica de diversas fibras naturales

Fibra	Temperatura Límite de degradación °C	Referencia
Alcachofa	230	
Bambú	214	(Fiore et al., 2011),
Bagazo	222	
Okra	220	
Cáñamo	250	
Curauá	230	(DeRosa et al., 2011),
Kenaf	219	
Yute	205	
Juncus effusus L	220	(Maache et al., 2017)
Algodon	221	
Cascarilla de arroz	223	
Paja de arroz	228	(Yao, Wu, Lei, Guo, & Xu Y., 2008)
Madera de arce	221	
Madera de pino	234	
Saharan aloe vera cactus	238	(Balaji & Nagarajan, 2017
Napier grass	250	(Haameem, y otros, 2016),
Althaea	220	(Sarikanat, Seki, Sever, & Durmuskahya, 2014)
Areca	210	(Yusriah, Sapuan, Zainudin, & Mariatti, 2014),
Caña de azúcar	200	(Hossain, y otros, 2014),
Cissus quadrangularis	290	(Indran & Raj R.E., 2015)
Proporis juliflora bark	217	(Saravanakumar, Kumaravel, Nagarajan, Sudhakar, & Baskaran, 2013),
Damagua	210	
Werregue	219	
Palma estera	225	(Mora & Ramón B.A., 2017),
Cañaflecha	220	
Iraca	227	
Cumare	230	(Mora. W.J. & Ramón. B.A., 2017),
Moriche	214	
Guaruma	222	
Esparto	210	(Mora W. , 2017).
Cabecinegro	204	

El comportamiento térmico de las fibras naturales juega un papel importante, debido al efecto negativo del aumento de la temperatura sobre los componentes de la fibra. este comportamiento garantiza que se conservan sus propiedades mecánicas durante los procesos de fabricación, como extrusión o el moldeo por inyección en termoplásticos (Mohanty, Misra, & Hinrichsen, 2000).

Debido a que la adhesión se puede mejorar con diversos métodos físicos, químicos o biológicos, el parámetro que define la selección de la matriz, es el límite de estabilidad térmica (Tabla 2); los valores obtenidos para las diversas fibras estudiadas se mantienen por encima de los 200°C, límite promedio en las que son estables la mayoría de las fibras naturales, por encima de esta temperatura es cuando sus componentes estructurales como la celulosa y hemicelulosa inician su descomposición.

De las investigaciones realizadas, la fibra que mayor estabilidad térmica arrojó fue la de cissus con 290°C, seguida por el Napier grass (250°C), Saharan aloe vera cactus (238°C) y las fibras de Curauá, alcachofa y cumare con un límite similar de 230°C. En general todas las fibras investigadas pueden soportar procesos de fabricación con temperaturas máxima de 200°C sin perder sus propiedades mecánicas.

3.3. Morfología.

La morfología de las fibras naturales, se analizó mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM). La estructura varía de acuerdo al número de células, el tamaño de las paredes celulares y lumen (agujero para transporte de humedad y nutrientes) (Thygesen, 2006).

La sección transversal de las fibras, influye directamente en las características y comportamientos mecánicos (Alves, Castro, Martins, Silva, & Toledo, 2013).

La variación se presenta generalmente al no tomar en cuenta la presencia de vasos de savia (lumen) que pueden representar una gran cantidad de área

hueca de la sección transversal total y este hecho puede afectar el resultado de las propiedades a tracción reportadas.

Un ejemplo de la variación en las propiedades, es el incremento de la resistencia a la tracción en aproximadamente 50% para la palma de durazno, al determinar adecuadamente la sección transversal descartando el área hueca, Otro caso lo presentan las fibras de abacá con errores en las desviaciones estándar del 268% con respecto al área verdadera formada solo por la pared celular (área maciza) (Parada Quinayá & D'Almeida, 2018).

La Tabla 3, compila algunas micrografías de las estructuras en diversas fibras naturales, donde se aprecian los tres componentes: el lumen, la pared celular y la laminilla media.

La microscopia electrónica de barrido (SEM) es ampliamente utilizada para el análisis de la microestructura en las fibras naturales, permitiendo determinar la influencia de su estructura en la resistencia a tracción, al determinar el área real entre el lumen y el espesor de pared celular, como lo demuestran las investigaciones realizadas por los autores citados en la tabla 3. Cabe resaltar que existe una relación directa entre el área transversal maciza de la fibra y su alta resistencia mecánica, si la cantidad de micro fibrillas de celulosa es alta y su ángulo respecto a la dirección de la carga tienda a cero (paralelas).

Asumiendo que la sección transversal de la fibra, el lumen y la laguna (agujero más grande) sean uniformes a lo largo de esta, la porosidad se calcula usando software para tratamiento de imágenes, lo cual permite calcular la relación de área porosa y el área maciza (Tran, y otros, 2015).

Algunas resistencias obtenidas en fibras de abacá (418-486MPa), coco (108-252 MPa), jute (393-800 Mpa), sisal (227-400MPa), caraua (158-729 MPa), cumare (220.5 MPa) y werregue (151-346 MPa), que poseen paredes celulares gruesas y zonas con ausencia de lumen, ratifican que soportan mejor la carga que otras fibras con estructura diferente.

Aunque algunas de ellas poseen esta estructura y no cumplen esta regla, como es el caso de las fibras de areca (123.9 MPa), cañaflecha (108-228 MPa), esparto (81-235 MPa) y fique (132.4 MPa), lo que puede ser ocasionado por la configuración interna de las microfibrillas y el ángulo que poseen.

También se observa que las fibras con lumen grande y paredes delgadas presentan una menor resistencia a la tracción como lo demuestran las fibras de caña de azúcar (169.5 MPa), Juncus effesus (113 MPa), damagua (11.4-26 MPa) y cabecinegro (9,9-25 MPa).

Otras fibras de estructura mixta (zonas con lumen abundante y zonas con paredes macizas) como el bambu (503 MPa) y el moriche (585 MPa) obtienen buenas propiedades gracias al incremento del área maciza de soporte.

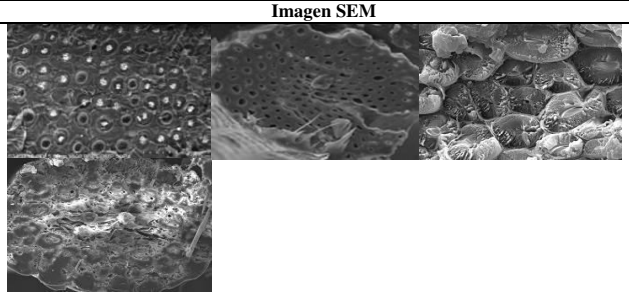
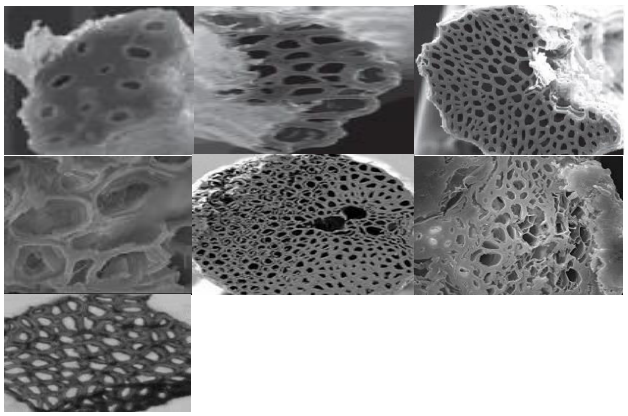
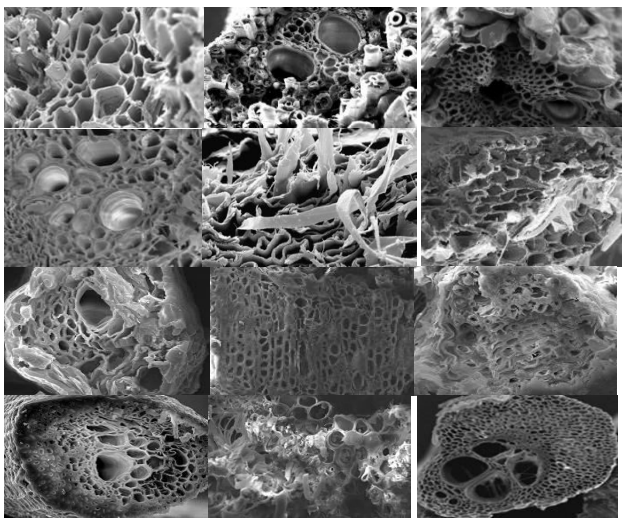
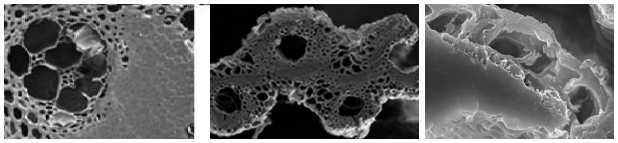
4. CONCLUSIONES

La resistencia mecánica de las fibras naturales está ligada en gran medida a la composición interna de las paredes celulares (microfibrillas de celulosa y ángulo), aunque el análisis de su morfología (espesor de la pared celular, cantidad y tamaño del lumen) puede predecir un buen comportamiento mecánico, algunas fibras con lumen pequeño y gran espesor de pared, demostraron lo contrario en los ensayos a tracción.

La humedad y la estabilidad térmica de las fibras naturales son variables relevantes en el proceso de fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. El carácter hidrófilo de las fibras naturales puede eliminarse mediante procesos de secado y tratamientos superficiales, pero la temperatura máxima que soporta sin degradarse es más compleja de modificar.

La morfología de las fibras naturales es muy variable entre una especie y otra, pero todas comparten tres componentes estructurales (el lumen, la pared celular y la laminilla media), que determinan en gran parte su resistencia mecánica, en donde las fibras con menor cantidad y tamaño de lumen generalmente son más resistentes.

Tabla 3. Morfología de diversas fibras naturales

Tipo de estructura	Imagen SEM	Referencia
Lumen pequeño y pared celular gruesa **Areca, Abacá, Cañaflecha,** **Esparto**		(Yusriah, Sapuan, Zainudin, & Mariatti, 2014), (Parada Quinayá & D'Almeida, 2018) (Mora & Ramón B.A., 2017) (Mora W. , 2017)
Lumen uniforme y pared celular gruesa **Caraua, jute, sisal** **Güerregue, coco, cumare** **Fique**		(Alves, Castro, Martins, Silva, & Toledo, 2013) (Mora & Ramón B.A., 2017) (Tran, y otros, 2015) (Mora W. , 2017) (Mina, 2012)
Fibras de lumen grande y asimétrico, con pared celular delgada **Caña de azúcar, Arundo, Juncus effesus,** **Palma datilera, alcachofa, seudotallo de plátano,** **Iraca, Damagua, Palma estera,** **Cabecinegro, Guaruma, Palma de durazno**		(Hossain, y otros, 2014), (Fiore, Scalici, & Valenza, 2014) (Maache, Bezazi, Amroune, Scarpa, & Dufresne, 2017) (Amroune, Bezazi, Belaadi, Zhu, & Scarpa, 2015) (Fiore et al., 2011) (Rodríguez, Fangueiro, & Orrego, 2015) (Mora & Ramón B.A., 2017) (Mora W. , 2017) (Parada Quinayá & D'Almeida, 2018)
Estructura mixta con lumen asimétrico y grande, con zonas de pared celular maciza **Bambu, Heliconia bihai, Moriche**		(Wang, Zhang, Jiang, Li, & Yu, 2015) (Parada Quinayá & D'Almeida, 2018) (Mora W. , 2017)

REFERENCIAS

Abraham, E., Deepa, B., Pothan, L., Jacob, M., Thomas, S., Cvelbar, U., & Anandjiwala, R. (2011). Extraction of nanocellulose fibrils from lignocellulosic fibres: A novel approach. Carbohydrate Polymers,Volume 86, Issue 4, 1468-1475.

Alves, Castro, Martins, Silva, & Toledo. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 149–157.

Amroune, S., Bezazi, A., Belaadi, A., Zhu, C., & Scarpa, F. (2015). Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibres from date palm fruit branches (Phoenix dactylifera L.). *Composites: Part A 71*, 95–106.

Arpitha, G., & Yogesha, B. (2017). An Overview on Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Reinforced Polymers. *Materials Today: Proceedings 4*, 2755–2760.

Balaji, A., & Nagarajan, K. (2017). Characterization of alkali treated and untreated new cellulosic fiber from Saharan aloe vera cactus leaves. *Carbohydrate Polymers 174*, 200–208.

Barneto A. G. Carmona J. A. Alfonso J. E. & Sánchez-Serrano R. (2010). Simulation of the thermogravimetry analysis of three non-wood pulps. *BioresourceTechnology*.

Bledzki A.K. Reihmane S. Gassan J. (1996). Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1329-1336.

Cruz, J., & Fangueiro, R. (2016). Surface modification of natural fibers: a review. Procedia Engineering 155, 285 – 288.

De Rosa, I., Kenny, J., Maniruzzaman, M., Moniruzzaman, M., Monti, M., Puglia, D., Sarasini, F. (2011). Effect of chemical treatments on the mechanical and thermal behaviour of okra (Abelmoschus esculentus) fibres. *Composites Science and Technology 71*, 246–254.

Dicker, M. P., Duckworth, P. F., Baker, A. B., & Francois, G. (2014). Green composites: A review of material attributes and complementary applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 56*, 280-289.

Eichhorn, S., Baillie, C., Zafeiropoulos, N., Mwaikambo, L., Ansell, M., & Dufresne, A. (2001). Current international research into cellulosic fibres and composites. *J Mater Sci*, 2107–31.

Faruk, O., Bledzki, K., Fink, P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science 37*, 1552– 1596.

Fiore V. Valenza A. & Di Bella G. (2011). Artichoke (Cynara cardunculus L.) fibres as potential reinforcement of composite structures. *Composites Science and Technology 71*, 1138–1144.

Fiore, V., Scalici, T., & Valenza, A. (2014). Characterization of a new natural fiber from Arundo donax L. as potential reinforcement of polymer composites. *Carbohydrate Polymers106*, 77–83.

Francucci, G., & Rodriguez, E. (2014). Processing of Plant Fiber Composites by Liquid Molding Techniques: An Overview. *Polymer Composites*, DOI 10.1002/pc.

Gindl W. et al. (2006). Single fibre Characterisation of Viscose, Lyocell, Flax and Glass fibres. *European Conference on Composite Materials, Polymer*, 792.

Girisha, & Srinivas. (2012). Sisal/coconut coir natural fibers-epoxy composites: water absorption and mechanical properties. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 166–170.

Gómez, S., Guzmán, R., & Ramón, B. (2016). Review, materiales compuestos reforzados con fibras de fique. *Universidad Pontificia Bolivariana*.

Gordon C J. (2001). *Introducction fundamentals of fibre structure.* Cambrige. New Delhi: Elsevier.

Haameem, J., Abdul Majid, M., Afendi, M., Marzuki, H., Fahmi, I., & Gibson, A. (2016). Mechanical properties of Napier grass fibre/polyester composites. *Composite Structures 136*, 1-10.

Ho Mei-po et al. (2012). Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites: Part B 43*, 3549–3562.

Hossain, M., Karim, M., Chowdhury, M., Imam, M., Hosur, M., Jeelani, S., & Farag, R. (2014). Comparative mechanical and thermal study of chemically treated and untreated single sugarcane fiber bundle. *Industrial Crops and Products 58*, 78-90.

Indran, S., & Raj R.E. (2015). Characterization of new natural cellulosic fiber from Cissus quadrangularis stem. *Carbohydrate Polymers 117*, 392–399.

Karnani R. Krishnan M. Narayan R. (1997). Biofiber-reinforced polypropylene composites. *Polym Eng Sci*, 476–82.

Maache, M., Bezazi, A., Amroune, S., Scarpa, F., & Dufresne, A. (2017). Characterization of a novel natural cellulosic fiber from Juncus effususL. *Carbohydrate Polymers 171*, 163–172.

Maldas D. Kokta BV. Raj RG. Daneault C. (1988). Improvement of the mechanical properties of sawdust wood fibre-polystyrene composites by chemical treatment. *Polymer*, 1255–65.

Mina, J. (2012). Caracterización físico-mecánica de un almidon termoplástico (TPS) de yuca y análisis interfacial con fibra de fique. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial (10) 2*, 99-109.

Miranda, Bica, Nachtigall, Rehman & Rosa. (2013). Kinetical thermal degradation study of maize straw and soybean hull celluloses by simultaneous DSC–TGA and MDSC techniques. *Thermochimica Acta 565*, 65– 71.

Mohan Rao, K., & Mohana Rao, K. (2007). Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite Structures 77*, 288–295.

Mohanty, A., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromol Mater Eng*, 1–24.

Mora, W. (2017). *Materiales biocompuestos reforzados con fibras naturales colombianas y matriz bioepoxy para aplicaciones en la industria automotriz.* Pamplona. Colombia: Universidad de Pamplona. Tesis maestría.

Mora, W., & Ramón B.A. (2017). Caracterización térmica, mecánica y morfológica de fibras naturales colombianas con potencial como refuerzo de biocompuestos. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 41(161)*, 479-489.

Mora. W.J., & Ramón. B.A. (2017). Biocompuesto de fibra natural de palma cumare (Astrocaryum Chambira) y resina bioepoxy, aplicaciones industtriales. *Revista de la Asociación Española de materiales compuestos*, 28-34.

Mukhtar, I., Leman, Z., Ishak, M., & Zainudin, E. (2018). Thermal and physicochemical properties of sugar palm fibre treated with borax. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 368*, 1-8.

Müssig, J., Fischer., Graupner, N., & Drieling, A. (2010). Testing Methods for Measuring Physical and Mechanical Fibre Properties (Plant and Animal Fibres). En J. Müssig, *Industrial Applications, Structure, Properties and Technical Applications* (pág. 537). Bremen, Germany: Wiley Series.

Parada Quinayá, D., & D'Almeida, J. (2018). Effect of surface treatments on the cross-section area and on the tensile properties of sisal fibers. *Journal of Natural Fibers.*, 1-8.

Pickering K et al. (2008). *Propierties and performance of natural-fibre composites.* Cornwall, england: Woodhead publishing.

Rodríguez, L., Fangueiro, R., & Orrego, C. (2015). Efectos de tratamientos químicos y de plasma DBD

en las propiedades de fibras del seudotallo de plátano. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.; 35 (2)*, 295-304.

Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G., & Zeng, H. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 1437-1447.

Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., & Paridah, M. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials 106*, 149–159.

Sanjay, M., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamaraikannan, P., & Senthil, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites:A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production 172*, 566e581.

Saravanakumar, S., Kumaravel, A., Nagarajan, T., Sudhakar, P., & Baskaran, R. (2013). Characterization of a novel natural cellulosic fiber from Prosopis juliflora bark. *Carbohydrate Polymers 92*, 1928– 1933.

Sarikanat, M., Seki, Y., Sever, K., & Durmuskahya, C. (2014). Determination of properties of Althaea officinalis L. (Marshmallow) fibres as a potential plant fibre in polymeric composite materials. *Composites: Part B 57*, 180–186.

Sarip, H., Hossain, M., Azemi, M., & Karim Allaf, K. (2016). A Review of the Thermal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass towards Glucose Production: Autohydrolysis with DIC Technology. *BioResources 11(4)*, 1-29.

Sydenstricker, T., Mochnaz, S., & Amico, S. (2003). Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. *Polym Test*, 375–80.

Thygesen. (2006). *Properties of hemp fibre polymer composites- An optimisation of fibre properties using novel defibration methods and fibre characterisation.* Denmark: Royal Veterinary and Agricultural University.

Tomczak, F., Sydenstricker, T., & Satyanarayana, K. G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1710–1721.

Toriz, G., Denes, F., & Young, R. (2002). Lignin-polypropylene composites. Part 1:composites from unmodified lignin and polypropylene. *Polym Composite*, 806–811.

Tran, L., Nguyen Minh, T., Fuentes, C., Truong Chi, T., Van Vuure, A., & Verpoest, I. (2015). Investigation of microstructure and tensile properties of porous natural coir fibre for use in composite materials. *Industrial Crops and Products (65)*, 437-445.

Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 59-64.

Wang, H., Zhang, X., Jiang, Z., Li, W., & Yu, Y. (2015). A comparison study on the preparation of nanocellulose fibrils from fibers and parenchymal cells in bamboo (Phyllostachys pubescens). *Industrial Crops and Products 71*, 80–88.

Yang H. Yan R. Chen H. Lee D. F. & Zheng C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel, 86,*, 1781–1788.

Yao F., Wu Q., Lei Y., Guo W., Xu Y.,. (2008). Thermal Decomposition Kinetics of Natural Fibers: Activation Energy with Dynamic Thermogravimetric Analysis. *Polymer Degradation and Stability, 93*, 90-98.

Yusriah, L., Sapuan, S., Zainudin, E., & Mariatti, M. (2014). Characterization of physical, mechanical, thermal and morphological properties of agro-waste betel nut (Areca catechu) husk fibre. *Journal of Cleaner Production 72*, 174-180.

PARTE D
Mantenimiento y
Docencia Universitaria

ACTUALIDAD DE LOS EGRESADOS DE INGENIERÍA MECÁNICA – UNIPAMPLONA.

PRESENT OF THE MECHANICAL ENGINEERING GRADUATES – UNIPAMPLONA.

PhD. Gonzalo G Moreno C[*], PhD. Elkin G Flórez[*]
PhD. Juan Carlos Serrano Rico [*]

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y Arquitectura,
Programa de Ingeniería Mecánica,
Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona (GIMUP).
Pamplona – Colombia, Km 1 vía Bucaramanga.
Tel.: (+57 7) 568 5303, Fax: (+57 7) 568 5303, Ext. 144
E-mail: gmoren, eflorez, jcserrano@unipamplona.edu.co

Resumen: En la actualidad un importante indicador de la calidad y actualidad de un programa académico se determina a través de la relación entre el programa y sus egresados, su éxito profesional. Periódicamente las Instituciones de Educación Superior y los programas académicos deben buscar alternativas que les permitan mejorar los canales de comunicación con los egresados y de esta forma saber su actualidad académica y profesional, adicionalmente permitir la participación de estos en los procesos de retroalimentación del currículo, Renovación de Registro Calificado, y Acreditación de Alta Calidad de los programas académicos. En el presente artículo se presenta parte de la información del proceso de seguimiento a los egresados del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona y como estos impactan en la sociedad.

Palabras clave: Egresados, seguimiento, nivel académico.

Abstract: Currently an important indicator of the quality and current of an academic program is determined through the relationship between the program and its graduates population, and their professional success. Periodically Higher Education Institutions and academic programs should seek alternatives that allow them to improve communication channels with graduates population and thus know the present of their graduated population and their professional success, in addition to allow their participation in the feedback processes of the curriculum, renovation of Qualified Registration, and Accreditation of High Quality of academic programs. In this article we present part of the information of the follow-up process to the graduates of the Mechanical Engineering program of the University of Pamplona and how these impact on society

Keywords: Graduated population, follow-up, academic level.

1. INTRODUCCIÓN

Frecuentemente las Instituciones de Educación Superior (IES) buscan conocer sobre la actualidad

de sus egresados, esto les permite saber cómo sus procesos de formación impactan en una sociedad y también poder determinar qué acciones o estrategias tomar con el fin de brindar mayores oportunidades a sus egresados o hacer que estos fortalezcan sus lazos con la universidad (Aldana *et al*., 2008; CINDA, 2004; Mendoza, 2003).

De acuerdo con Fresan (1998) el conocimiento de la actualidad de los egresados, le permite a las IES observar y conocer mucho mejor el mundo laborar y saber de esta forma si sus procesos de formación son los adecuados para el mundo que sus egresados van a enfrentar. En este sentido para De Vries & Navarro (2011) es muy preocupante para una institución saber que sus egresados no se encuentran laborando o que por el contrario se desempeñan en actividades diferentes para las cuales se prepararon.

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los programas académicos, el Ministerio de Educación Nacional (MEN) ha diseñado políticas para mejorar la calidad de la educación superior, las cuales son ejecutadas por el Sistema de Aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior (SACES) y sirven para otorgar el Registro Calificado a los programas de educación Superior.

Dentro de los aspectos evaluados para otorgar el registro calificado a un programa académico (CONACES, 2016; Contreras, 2006), se contempla la evaluación del desempeño de sus egresados y su relación con las competencias y el nivel de formación dados desde el programa; los canales de comunicación entre egresados y el programa; y en general su seguimiento. Es por todo esto que los egresados constituyen un importante indicador del impacto de un programa académico en la sociedad

Otro sistema empleado por el MEN para evaluar programas académicos, es por intermedio del Consejo Nacional de Acreditación (CNA), el cual emplea niveles más exigentes de calidad y se denomina Acreditación de Alta Calidad, este sistema también incluye los egresados como indicador de calidad de los programas; esto como estrategia para evaluar el proceso formativo y sus aportes en los diferentes sectores de la sociedad. Lo anteriormente mencionado se realiza mediante la utilización de herramientas que permitan realizar un seguimiento sobre su ocupación y ubicación profesional en correspondencia con la formación obtenida (Acreditación, 2013; Betancur y Torres, 2015).

Es por esto que Jaramillo *et al*., (2006) y Cabrera *et al*., (2003) recomiendan que una de las mejores formas para saber la evolución de los egresados y su actualidad es por medio de encuestas, las cuales le permitan a los programas académicos retroalimentarse y formular acciones y estrategias que les permitan mejorar (Moreno *et al*., 2012; Velásquez *et al*., 2016).

En el presente artículo y siguiendo la estrategia descrita, el programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona describe algunos aspectos importantes de los egresados y de su actualidad, todo esto enmarcado dentro del continuo proceso de Acreditación y Alta Calidad del programa.

2. ACTUALIDAD DEL PROGRAMA

De acuerdo con Jaramillo *et al*., (2006) las principales motivaciones para realizar los estudios de egresados es poder mejorar los canales de comunicación con estos y conocer sobre sus experiencias y el impacto de estos en la sociedad; desde este punto de vista se sugiere un estudio del tipo longitudinal (follow-up) a través del cual se hace un seguimiento periódico que permita observar la evolución de los egresados.

Teniendo en cuenta estos aspectos se realizó una encuesta con una participación aproximada del 80% de los egresados del programa, a través de la cual se consultó la actualidad laboral y educativa de los egresados del programa. En la Fig. 1 se puede observar que gran parte de los egresados, aproximadamente el 37 %, están realizando o han realizado posgrados, esto les permite obtener ascensos en sus trabajos y por ende una mejor remuneración salarial.

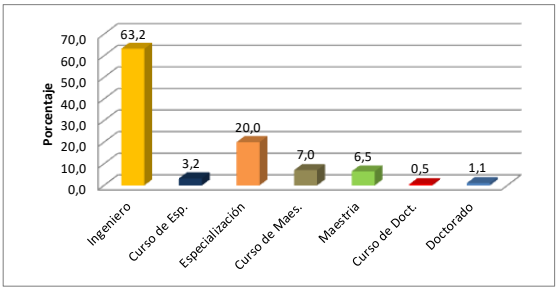


Figura 1. Actualidad educativa
Fuente: Los autores

Respecto al lugar de trabajo, la Fig. 2 muestra que un alto porcentaje de los egresados se encuentran laborando en el país, impactando la industria nacional; un pequeño porcentaje, pero muy importante, se encuentran laborando a nivel internacional (5,4%), y cerca de un 10% de los egresados se encuentran desempleados, en este sentido se han creado grupos de apoyo en redes sociales y canales de comunicación institucionales con el fin de canalizar por estos medios ofertas laborales y educativas para los egresados.

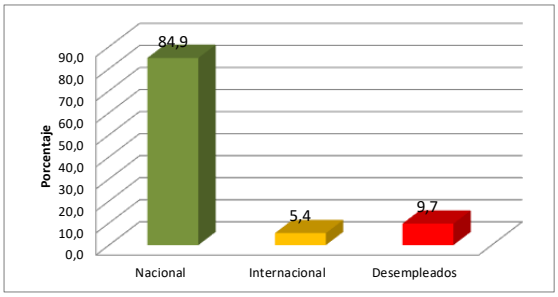


Figura 2. Lugar de trabajo
Fuente: Los autores

En cuanto al tipo de empresa en la cual se encuentran los egresados, la Fig. 3 muestra que cerca de un 73% de los egresados se encuentran laborando en el sector productivo, un 18 % en el sector educativo, y algo muy importante de resaltar es la capacidad emprendedora de nuestros egresados, ya que cerca de un 10 % de estos han creado sus empresas.

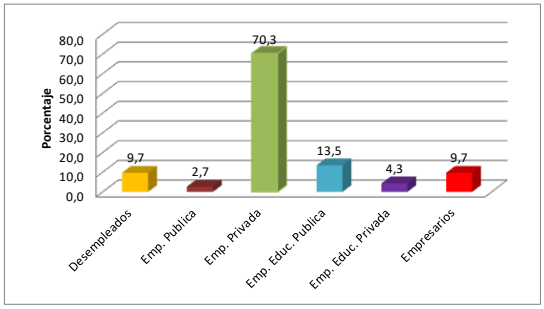


Figura 3. Tipo de empresa
Fuente: Los autores

Continuando con este análisis, la Fig. 4 muestra que el campo de actuación profesional de los Ingenieros Mecánicos de la Universidad de Pamplona es bastante amplio e impactan en varios sectores de la economía; se destacan principalmente los siguientes sectores: educativo (18%), Petróleo & Gas (12.6%), minería (8.4%) y transporte (8.4%), entre otros igualmente importantes.

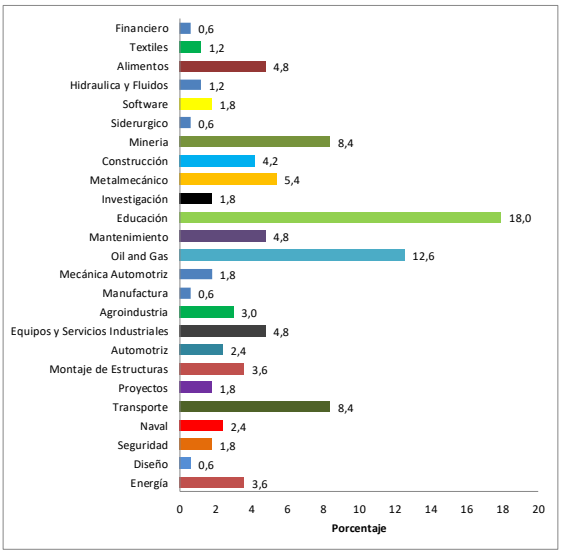


Figura 4. Sector empresarial
Fuente: Los autores

Los resultados obtenidos muestran que la calidad y nivel de los egresados del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona es muy bueno, ya que la empleabilidad de estos es bastante alta y les ha permitido actuar y posicionarse laboralmente en diferentes áreas del que hacer de su profesión. Adicionalmente, toda la información obtenida para la elaboración del presente trabajo nos será útil en la toma de decisiones en temas trascendentales para el futuro del programa, como lo son la reforma curricular (Castrillón, 2018), el procesos de acreditación de alta calidad, la creación de una maestría y lógicamente continuar en comunicación con los egresados y afianzar más los lazos de cooperación con estos.

3. CONCLUSIONES

A través del seguimiento de los egresados se puede demostrar la calidad de los programas académicos y como estos impactan positivamente en una sociedad y su entorno.

Este estudio también muestra los diferentes sectores de actuación del ingeniero mecánico de la

Universidad de Pamplona y hacia donde deben de ir direccionados los planes de mejoramiento del programa.

Es importante que las IES y los programas académicos mejoren los canales de comunicación con sus egresados, esto les permitirá a futuro obtener una mayor participación de estos en los diferentes procesos de actualización académica de los programas.

REFERENCIAS

Aldana, G. M., Morales, F. A., Aldana, J. E., Sabogal, F. J., y Ospina, A. R., (2008). Seguimiento a egresados. Su importancia para las instituciones de educación superior. Revista Teoría y Praxis Investigativa. vol.3, n.2.

CINDA (2004). Competencias de egresados universitarios. Centro Interuniversitario de Desarrollo (CINDA) Santiago de Chile. ISBN: 956-7106-45-2

Mendoza, C. E. (2003). Siguiendo el Rastro de los Egresados. Revista Fundación Universitaria del Área Andina. Bogotá. n. 2 (Ene - Jul. 2003), p.30.

Fresan, M. (1998) "Los estudios de egresados. Una estrategia para el autoconocimiento y la mejora de las instituciones de educación superior". En: Esquema básico para estudios de egresados. Mexico: ANUIES. ISBN: 968 779 842 4

De Vries, W., & Navarro, Y. (2011) ¿Profesionistas del futuro o futuros taxistas? Los egresados universitarios y el mercado laboral en México. Rev. Iberoamericana de Educación Superior, vol.2, n.4, pp.3-27. ISSN 2007-2872.

CONCACES, (2016) GUIA PARA LA ELABORACION DEL DOCUMENTO MAESTRO DE REGISTRO CALIFICADO. Disponible:https://www.mineducacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/articles-358734_guia_documento_maestro.pdf Consultado:<05/03/2018>.

Contreras, J. S. (2006). Efectos de la acreditación en las instituciones y programas de ingeniería en Colombia. Revista Educación en Ingeniería, 1(1), 19-25.

Acreditación, S. N. (2013). Lineamientos para la Acreditación de programas de Pregrado. Disponible: https://www.cna.gov.co/1741/articles-186359_pregrado_2013.pdf Consultado:<05/03/2018>.

Betancur, N. E. H., & Torres-Madronero, M. C. (2015). Acreditación de programas en ingeniería en la región: Análisis comparativo. Revista Educación en Ingeniería, 10(19), 80-89.

Jaramillo, A., Giraldo, A., Ortiz, J. (2006). Estudios sobre egresados. La experiencia de la Universidad EAFIT. Revista Universidad EAFIT. vol.42. n.141

Cabrera, A. F., Weerts, D. J., Zulick, B. J. (2003). Encuestas a egresados: tres fundamentos conceptuales en el seguimiento de egresados universitarios. Métodos de análisis de la inserción laboral de los universitarios, vol.55, pág.1234-1242.

Moreno, G., Flórez, E., Peña, C. (2012) Aplicación Social de la asignatura Diseño Mecánico en la Carrera de Ingeniería Mecánica. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada ISSN: 1692-7257 ed: Java Eu – Universidad de Pamplona. v.2 fasc.20 p.65 - 71.

Velásquez, T., Espinel, E., Guerrero, G. (2016) Teaching Strategies in the Classroom. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada ISSN: 1692-7257, Universidad de Pamplona. v.2 n.28 p.124 - 131.

Castrillón, J. E. P. (2018). Construcción de la competencia investigativa en ingeniería. Revista Educación en Ingeniería, 13(25), 12-19.

USO DE TECNOLOGÍAS MÓVILES APLICADAS A LA ENSEÑANZA DE PROYECCIONES ORTOGONALES EN EL CURSO EXPRESIÓN GRÁFICA I

USE OF MOBILE TECHNOLOGIES APPLIED TO THE TEACHING OF ORTHOGONAL PROJECTIONS IN THE COURSE EXPRESIÓN GRÁFICA I

Esp. Nómar Alexis Cárdenas Parada, MSc. Yymmy Sydney Estévez Carvajal, PhD. Bladimir Azdrubal Ramón Valencia

[*] **Universidad de Pamplona,** Facultad de ingenierías y arquitectura.
Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Teléfono y Fax, con indicativos internacional y nacional.
E-mail: nomar.cardenas@unipamplona.edu.co.

Resumen: El curso expresión gráfica I busca capacitar a los estudiantes de ingeniería para que puedan comunicarse a través del dibujo. El desarrollo de las habilidades espaciales es fundamental para cumplir con este objetivo. Sin embargo algunos alumnos presentan dificultades con la enseñanza tradicional, por tanto, se propone implementar herramientas didácticas de fácil acceso aplicando modelos tridimensionales virtuales los cuales pueden ser vistos y manipulados en dispositivos móviles a través de aplicaciones bien sea, de realidad aumentada o de visualización que sirvan de apoyo a los estudiantes con problemas en el desarrollo de habilidades espaciales o para aquellos que deseen profundizar en el tema. Los modelos propuestos fueron realizados en un programa CAD, empleado un código de colores para identificar los tipos de planos que conforman el objeto, estos modelos luego pueden ser enlazados a marcadores usando una aplicación de realidad aumentada o enviados directamente al teléfono del estudiante. Durante la implementación se empleó un sitio web como repositorio y una guía física donde se explica el uso de la herramienta, logrando no solo dar un mejor entendimiento a los temas expuestos en clase sino despertar el interés del estudiante por las TIC.

Palabras clave: Dibujo técnico, herramientas didácticas, realidad aumentada, TIC.

Abstract: The course of Expresión gráfica I aims to train engineering students so that they can communicate through drawing. The development of spatial skills is fundamental to fulfill this objective: however, some students have difficulties that cannot be overcome with the basic tools of traditional teaching. Therefore, easy-to-access didactic tools are proposed by applying virtual three dimensional models that can be seen or manipulated in mobile devices through applications that are either augmented reality or visualization. This can help students with problems in the development of spatial skills or for those who wishes to deepen the subject. The proposed models were made in a CAD program, using a color code to identify the types of planes that compose the object, these models can be linked through an augmented reality application or directly sent to the student's phone. During the implementation a website was used as the repository and a physical guide which explained the use of the tool and to achieve not only a better understanding of the topics exposed in class, but also to arouse the student's interest in ICT.

Keywords: Technical drawing, didactic tools, augmented reality, ICT.

INTRODUCCIÓN

El dibujo técnico es un lenguaje universal, una forma de obtener y transmitir información. Este lenguaje es empleado por los ingenieros de forma intensiva, especialmente en tareas de diseño y construcción de productos y procesos. El dibujo técnico desarrolla en el estudiante un grupo de habilidades especificas conocidas como habilidades espaciales (Saorín *et al.*, 2005), definidas por Gardner (1987) como "la capacidad de percibir con precisión, las relaciones visuales espaciales, y de recrear algunos aspectos de la experiencia visual sin la presencia de los estímulos correspondientes"

Con el fin de formar ingenieros competentes en el campo del dibujo técnico, todos los programas de ingeniería de la Universidad de Pamplona contemplan un curso básico de dibujo en sus planes de estudio (expresión gráfica I) y dependiendo de la necesidad, algunos programas complementan esta formación a través de un segundo curso (expresión gráfica II) como es el caso de la Ingeniería Mecánica, Civil, entre otros.

El curso de expresión gráfica I, al ser un curso de fundamentos, está diseñado para ir desde lo más simple a lo más complejo. Durante el desarrollo de las clases es normal que algunos estudiantes presenten dificultades, las cuales se incrementan al abordar la unidad de proyecciones tridimensionales, el aprendiz promedio no se apropia de las ideas expuestas con facilidad, y en consecuencia algunos estudiantes no consiguen dominar los fundamentos del dibujo de proyección.

Con el propósito de estimular el desarrollo de habilidades espaciales y con ello un mejor desempeño por parte de los estudiantes, en ocasiones se recurre al uso de modelos físicos conocidos como sólidos los cuales están hecho de madera, arcilla, etc. Una simple pero potente herramienta didáctica que permite realizar ejercicios de coordinación mano-ojo (Tristancho *et al*., 2014). Los modelos físicos también presentan algunas limitaciones como la imposibilidad de tener varias copias del modelo en una misma clase, situación que facilitaría la manipulación por parte de todos los estudiantes o su corta vida útil, pues solo son aprovechables durante una única sesión tras la cual generalmente son almacenados.

Es así, cuando se hace necesario explorar otras alternativas que puedan ser empleadas como herramientas didácticas en la enseñanza del dibujo técnico. En ese sentido el uso de dispositivos móviles para la formación y educación, más conocido como M-learning es un tema que cobra cada vez más relevancia (López y Silva *et al.*, 2014).

Otra alternativa que ha sido explorada en la enseñanza del dibujo técnico en los últimos años es el uso de la realidad aumentada (AR), la cual es definida como una tecnología que combina elementos reales y virtuales, que es interactiva en tiempo real y está registrada en tres dimensiones (Azuma, 1997).

En ese orden de ideas es posible destacar trabajos como el realizado por, De la Torre y su grupo de colaboradores, quienes emplearon tabletas para estimular la comprensión del espacio tridimensional en tres grupos de personas completamente heterogéneos haciendo uso de la realidad aumentada (De la torre *et al.*, 2013), un concepto que aunque incipiente vale la pena seguir explorando.

En la literatura es posible hallar muchas más investigaciones relativas al tema, las cuales dan cuenta de la utilidad de la realidad aumentada como herramienta didáctica en la enseñanza del dibujo técnico (Martín 2010), (Tristancho 2014), (Font 2015), (Calderón 2015), pero es importante mencionar que ninguno de estos estudios empleó el Smartphone como medio para el desarrollo de sus propuestas.

Ante esta situación nace la oportunidad de emplear el teléfono inteligente o Smartphone como herramienta didáctica, siendo este un recurso tecnológico que la mayoría de las personas posee en la actualidad y sobre el cual se han realizado

investigaciones que dan cuenta de su potencial (Organista *et al.*, 2013).

Por tanto se propone implementar el Smartphone como herramienta didáctica de fácil acceso en las clases de proyecciones tridimensionales para el curso de expresión gráfica I, buscando desarrollar las habilidades espaciales de los estudiantes a través de la visualización de modelos virtuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material a describir y los métodos empleados corresponden a la experiencia docente registrada durante el segundo semestre del año 2017 y el primer periodo del 2018 en el curso de expresión gráfica I en la Universidad de Pamplona.

La propuesta implementada incluyó la recolección de datos de los 57 estudiantes que hicieron parte de la prueba piloto a partir de un instrumento tipo encuesta durante el segundo semestre del año 2017. A continuación se presentan los datos más relevantes de la caracterización llevada a cabo, ver figuras del 1 al 5.



Figura 1 Presaberes de los estudiantes proyecciones.



Figura 2 Conocimiento del concepto AR



Figura 3 Estrato de los estudiantes

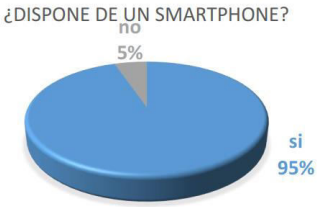


Figura 4 Disponibilidad de Smartphone



Figura 5 Disponibilidad de plan de datos

Así mismo, para el desarrollo del diseño didáctico se crearon 12 poliedros (también conocidos como sólidos) a partir del software Autocad haciendo uso de una licencia educativa, como se aprecia en la Figura 6 Modelos CAD. Igualmente, se implementó un código de colores para identificar y clasificar los diversos tipos de planos y superficies que conforman el sólido, se seleccionaron los colores verde, azul, rojo, amarillo y ocre para representar los planos horizontales, verticales, inclinados, oblicuos y las superficies curvas respectivamente.

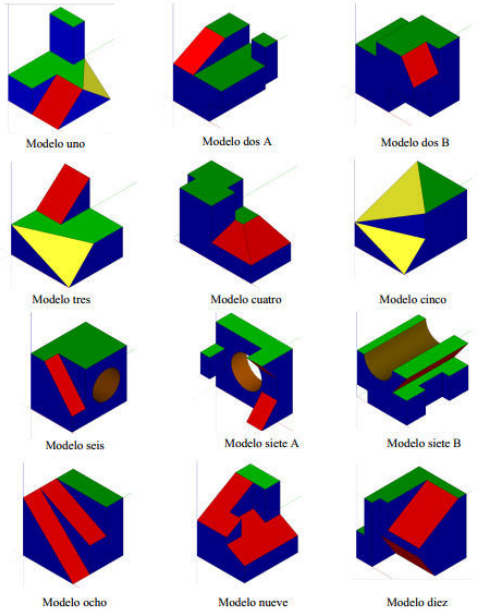


Figura 6 Modelos CAD

En orden de crear los modelos de realidad aumentada se evaluaron diversas plataformas como Aumentaty y sus programas Creator y Scope, debido a la facilidad de uso y licencia gratuita aunque limitada. Creator es una aplicación de escritorio que permite enlazar modelos CAD a imágenes individuales empleadas como marcadores y compilar un archivo de proyecto que posteriormente será almacenado en la base de datos de la plataforma. Por su parte Scope es una aplicación para android que permite acceder a la base de datos de Aumentaty descargar el proyecto en cuestión y escanear los marcadores seleccionados.

Una vez realizado el proceso descrito, el estudiante podrá visualizar los archivos CAD como modelos de realidad aumentada en la pantalla del Smartphone. La herramienta didáctica se completa al agrupar todoFs los marcadores empleados en una pequeña cartilla que es puesta a disposición de los estudiantes.

En el desarrollo del curso, los fundamentos de la teoría proyección fueron expuestos a partir de una clase magistral, como el método tradicional indica, tras la cual es necesario realizar una práctica para afianzar los conceptos teóricos, es este el momento donde se sugiere introducir la herramienta didáctica desarrollada generando un entorno de aprendizaje colaborativo tal como se parecía en la figura 7.

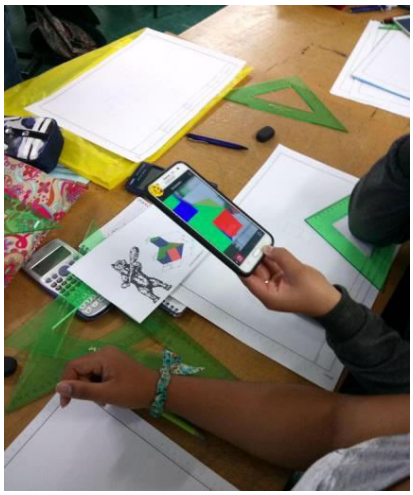


Figura 7 Uso de la herramienta didáctica

Tras la introducción de la herramienta didáctica es posible apoyar el desarrollo de las clases restantes en la unidad proyecciones tridimensionales con los demás modelos propuestos, buscando siempre que el estudiante interactúe con los sólidos y encuentre en ellos una alternativa para fortalecer los conceptos expuestos en clase.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la aplicación de la encuesta, es posible confirmar algunos hechos presumibles, en primer lugar la mayoría de los estudiantes que cursan la asignatura cuenta con un teléfono inteligente, que es el principal requerimiento para la aplicación de la herramienta didáctica, lo anterior muy a pesar de que la población encuestada se concentra en los estratos socioeconómicos 1 y 2.

Por otra parte, es importante establecer que la conexión de datos se convierte en una limitante, debido a que los estudiantes no cuentan con este recurso de manera gratuita, este dato es importante sobre todo cuando se planifican las clases. Respecto al campo de los presaberes, se aprecia que más o menos la mitad de los estudiantes bien tiene formación en teoría de proyección o por lo menos ha oído mencionar la tecnología de realidad aumentada.

Debido a que continuamente se desarrollan nuevas aplicaciones para Smartphone, durante el primer periodo académico de 2018 se decidió implementar otra tecnología en lugar de AR. La idea fue emplear la aplicación A360 de autodesk, la cual permite visualizar modelos 3D en formato .dwg (formato empleado por autoCAD) directamente en el Smartphone.

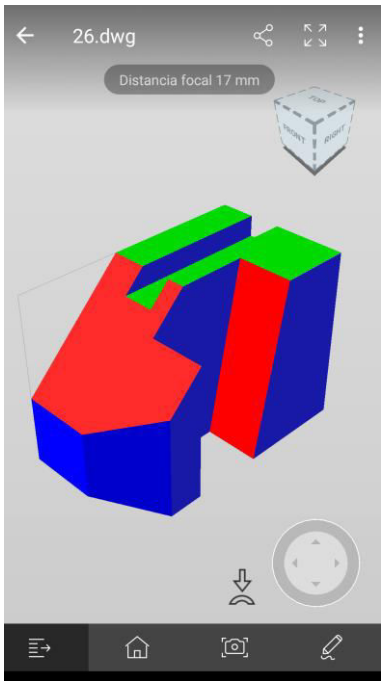


Figura 8 Modelo CAD A360

En la figura 8 Modelo CAD A360 se aprecia una captura de pantalla tomada en un teléfono inteligente mientras se usa la aplicación en mención. Con el fin de que los obtuvieran los archivos para las correspondientes clases se empleó un blog web, desde el cual cada estudiante debía descargar el material antes de asistir a clase.

Finalizado el segundo periodo de implementación es posible comparar y resaltar algunas ventajas y desventajas encontradas en el uso de cada tecnología expuesta. En el caso de la realidad aumentada el tener que enfocar un marcador de forma permanente puede considerarse como una limitante debido a que el usuario tendrá problemas al visualizar una proyección de elevación (una proyección donde se pueda medir la dimensión de altura) puesto que la aplicación no logra escanear el marcador en estos casos. A pesar de lo anterior, el mismo hecho de tener que enfocar el marcador, brinda al usuario la sensación de que el objeto realmente se encuentra en el lugar, sensación que no existe con las aplicaciones de visualización pura.

A diferencia de la realidad aumentada, la exploración de los modelos CAD a través de la aplicación de visualización pura se realiza en un ambiente completamente virtual, sin embargo la navegación en el modelo es intuitiva pues es posible emplear gestos conocidos por los usuarios de los teléfonos inteligentes, además A360 integra a la interfaz de usuario otras opciones como el viewcube que permite obtener directamente las proyecciones principales del objeto en pantalla.

Es importante aclarar que el tipo de proyección empleada tanto en los modelos en Aumentaty como en A360 corresponden a una proyección convergente, la cual es usada para imitar un objeto real pues agrega efectos de perspectiva, mientras que la teoría de proyección expuesta en el curso corresponde a una proyección paralela donde no influye la distancia que separa los planos de proyección, esta diferencia puede hacer que un alumno malinterprete ciertas proyecciones al explorar los modelos. Sin embargo la aplicación A360 permite modificar un parámetro conocido como distancia focal, el cual atenúa los efectos de perspectiva inherentes al modelo, de esta forma es posible generar visualizaciones que corresponden mejor a los modelos simplificados expuestos en el curso.

Por último, se debe resaltar el papel que juegan los estudiantes, actores principales en el proceso de enseñanza aprendizaje, su disposición es vital para el desarrollo del curso y de las actividades propuestas, ellos son los encargados de instalar las aplicaciones necesarias en su dispositivo y descargar el material didáctico, capturar su atención y motivarlos constantemente es fundamental en todo momento.

CONCLUSIONES

Ante la imposibilidad de contar con una sala de cómputo dedicada al manejo de un software CAD que complemente los fundamentos teóricos expuestos en el curso expresión gráfica, el Smartphone se erige como una herramienta que los docentes pueden explotar teniendo en cuenta la gran cantidad de contenido y plataformas que existen en la actualidad, dinamizando y sirviendo como apoyo para las tareas propuestas dentro y fuera del aula (trabajo independiente) actuando como herramienta ubicua, no obstante se deben establecer normas de uso consensuado para evitar malas prácticas que causen un detrimento del acto educativo (Organista *et al.*, 2013).

Se constata de primera mano que la tecnología de realidad aumentada es útil dentro de las clases de proyecciones tridimensionales tal como lo indican los estudios consultados, incluso si se implementa a través de un dispositivo móvil como el Smartphone, pero al no ser una tecnología desarrollada directamente para el campo del dibujo técnico presenta algunas limitantes que podrían ser salvadas con desarrollo especifico del software.

La capacidad (procesamiento y almacenamiento) de los Smartphones en la actualidad permite el uso de aplicaciones de visualización de modelos CAD como herramienta didáctica, que aunque emplean un entorno netamente virtual, ofrecen ventajas de visualización al ser programas desarrollados específicamente para el campo del dibujo de ingeniería.

REFERENCIAS

Saorín, J. L., Navarro T., R., Martín D., N. y Contero, M. (2005) *Las habilidades espaciales y el programa de expresión gráfica en las carreras de ingeniería*, ICECE 2005.

Gardner, H. (1987). *The theory of multiple intelligences*. Annals of Dyslexia, **Vol. 37**, 19–35

Tristancho O., J. A., Vargas T., L. F. y Contreras B., L. E. (2014) *Evaluación de técnicas tradicionales y TIC para el desarrollo de habilidades espaciales en estudiantes de primer semestre de ingeniería industrial*. Revista Virtual Universidad Católica Del Norte, **Vol. 43**, 34–50.

López H., F. A. y Silva P., M. M. (2014) *M-learning patterns in the virtual classroom*. Universities and Knowledge Society Journal, **vol. 11**, núm. 1, 208-221.

Azuma, R. (1997). *A survey on augmented reality.* Presence: Teleoperators and Virtual Environments, **Vol. 6**, No. 4, 355–385.

De la Torre C., J., Martin D., N., Saorín P., J. L., Carbonell C., C. y Contero G., M. (2013). *Entorno de aprendizaje ubicuo con realidad aumentada y tabletas para estimular la comprensión del espacio tridimensional*. RED. Revista de Educación a Distancia, Núm. 37, 1–17

Martín G., J. (2010) *Estudio y evaluación de contenidos didácticos en el desarrollo de las habilidades espaciales en el ambito de ingeniería.* **Vol I**, Universidad politécnica de Valencia.

Font O., C. (2015) *Desarrollo de la capacidad espacial en el alumnado de dibujo técnico I a través de la realidad aumentada.* Trabajo fin de master, Universidad internacional de la Rioja.

Calderón, F. (2015). *Realidad aumentada aplicada a la enseñanza de la geometría descriptiva*. Revista AUS, núm. 18, 18–22.

Organista S., J., McAnally S., L y Lavigne G. (2013). *El teléfono inteligente (smartphone) como herramienta pedagógica.* Revista Apertura, **vol. 5**, núm. 1, abril, 2013, pp. 6-19.

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ BASADO EN UN DIAGNOSTICO TRIBOLÓGICO

AUTOMOTIVE MAINTENANCE BASED ON A TRIBOLOGICAL DIAGNOSIS

Ing. Miguel Ángel Olivares Torres*, PhD. Andrés López Velázquez*
PhD. Rosario Aldana Franco*, PhD. Ervin Jesús Alvarez Sánchez*

* **Universidad Veracruzana,** Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Campus Xalapa, Cuerpo Académico Ingeniería Transdisciplinar.
Circuito Dr. Gonzalo Aguirre Beltrán S/N, C.P. 91000, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, México.
Teléfono (+52) (228) 8421757 Ext. 11642.
E-mail: legna_tovares@hotmail.com, andreslv66@hotmail.com, {andlopez, raldana, eralvarez}@uv.mx

Resumen: En este trabajo se presenta un plan de mantenimiento automotriz basado en un diagnóstico tribológico del aceite lubricante de origen mineral grado *SAE 20W50* multigrado, utilizado en la lubricación de un motor de combustión interna de cuatro cilindros, 1800 cm^3, motor en posición diagonal, enfriado por anticongelante, con un sistema de lubricación por bomba mecánica. Las muestras se obtuvieron bajo diferentes condiciones de uso: 0 km, 1000 km, 5000 km y 8500 km; mismas que se sometieron a diversos ensayos, tales como: Viscosidad cinemática a 40°C y 100°C (*Norma ASTM-D445*), Desgaste (*Norma ASTM G99-05*), Timken (*Norma ASTM-D-2782-17*) y Análisis de Aceite; esto con la finalidad de diagnosticar la degradación del aceite lubricante y el desgaste generado, considerando estos resultados, se formuló un plan de mantenimiento automotriz basado en un diagnostico tribológico del aceite lubricante del motor en estudio.

Palabras clave: Mantenimiento Automotriz, Lubricantes, Desgaste, Diagnostico Tribológico.

Abstract: This paper presents an automotive maintenance plan based on a tribological diagnosis of lubricating oil of mineral origin *SAE 20W50* multigrade grade, used in the operation of a four-cylinder internal combustion engine, 1800 cm3, engine diagonally, cooled by antifreeze, with a lubrication system by mechanical pump. The samples were obtained under different conditions of use: 0 km, 1000 km, 5000 km and 8500 km; which were subjected to various tests, such as: Kinematic viscosity at 40 ° C and 100 ° C (*Standard ASTM-D445*), Wear (*Standard ASTM G99-05*), Timken (*Standard ASTM-D-2782-17*) and Analysis of oil; this in order to diagnose the degradation of the lubricating oil and the wear generated, considering these results, an automotive maintenance plan was formulated based on a tribological diagnosis of the lubricating oil of the engine under study.

Keywords: Automotive Maintenance, Lubricants, Wear, Tribological Diagnosis.

1. INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna son un tipo de máquinas térmicas que su funcionamiento se basa en obtener energía mecánica a partir de la energía interna liberada por el combustible al quemarse en su interior (Giacosa, 2000). Este tipo de motores también es referido como alternativos y se clasifican de acuerdo con su ciclo termodinámico en: Motores de dos y cuatro tiempos (Alvarez, 2010). Cualquiera de estos motores puede ser operado a gasolina o Diesel. (Área tecnologica, 2010).

Las aplicaciones más relevantes de los motores a gasolina de dos tiempos han sido en motores pequeños como motosierras y podadoras (Widman International SRL, 2018). En el caso de los motores a Diesel de dos tiempos sus aplicaciones radican en los motores navales de gran potencia (Giacosa, 2000). En relación con las aplicaciones principales de los motores de cuatro tiempos tanto a gasolina como a Diesel es en el transporte terrestre (Área tecnologica, 2010).

El mantenimiento que requieren este tipo de motores para su correcto funcionamiento depende en gran medida de una adecuada lubricación (Lublearn, Noria, 2016; 2018; Motor, 2015 y Lima 2016). Por lo que en este trabajo se propone una metodología de mantenimiento automotriz basado en un diagnóstico tribológico que optimice la vida útil del aceite lubricante en el motor.

2. METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de este diagnóstico se basó en lo siguiente: Medición de viscosidad, análisis del aceite lubricante, desempeño lubricante y resistencia de la película lubricante (*ASTM-D-2782-17)* (Universidad Veracruzana, 2016), y ensayos de desgaste *(ASTM G99)* (Universidad Veracruzana, 2016) de un aceite lubricante automotriz, en distintos momentos de uso (kilometraje), con el propósito de establecer un plan de mantenimiento automotriz basado en un diagnostico tribológico.

2.1 Medición de viscosidad

La medición de viscosidad del aceite lubricante se determinó a 40°C y 100°C; con el propósito de verificar el estado de dicho parámetro, para poder correlacionarlo con el desempeño lubricante del mismo (Lublearn, Noria, 2016).

2.2 Análisis del aceite lubricante.

Para la determinación de las condiciones del aceite en este rubro, se utilizó el analizador de aceites *Oilview Quick-check*. Los aspectos del análisis del lubricante se enfocaron en tres áreas críticas de los aceites lubricantes:

- Degradación química.
- Contaminación por agua.
- Presencia de partículas por desgaste.

2.3 Ensayo Timken, ASTM-D-2782-17

Esta característica se determinó de acuerdo con la norma *ASTM-D-2782-17,* ensayo Timken. El equipo que se utilizó fue una maquina Timken de la *marca KILL A WATT* como se muestra en la figura 1, para lo cual se emplearon esferas de acero inoxidable *AISI 420 grado 1000* que se limpian con keroseno para la eliminación de impurezas.

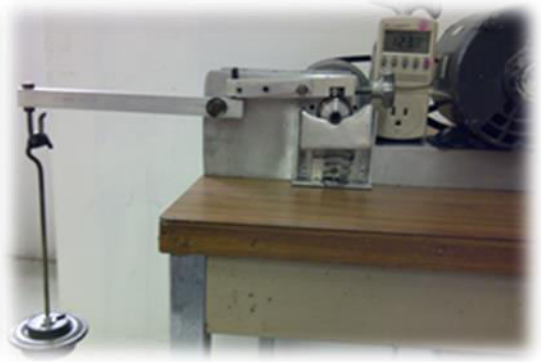


Fig. 1. Máquina Timken. Laboratorio de Tribología, FIME-Xalapa. Universidad Veracruzana .

2.3.1 Desempeño de la película lubricante.

Para la realización de estos ensayos se utilizó una muestra 10 ml de aceite lubricante. Este ensayo consiste en colocar una esfera de acero inoxidable en el extremo del brazo, a través del cual se

aplicará una fuerza. En el otro extremo del brazo se colocan cargas para aplicar 10 kg durante 10 minutos a una velocidad de 800 rpm, se toma la medición de la temperatura inicial y la temperatura final alcanzada en el ensayo.

2.3.2 Resistencia al rompimiento de la película lubricante.

Para el rompimiento de la película, se coloca una carga de 25 kg en el brazo de carga y cada minuto se va incrementando 5 kg, se registra la temperatura en el contacto cada minuto, el rompimiento de la película se detecta de manera audible y cuando la maquina se amarra, se debe de apagar el equipo, parar el tiempo y realizar la medición de la temperatura que se alcanzó al final del ensayo *(ASTM-D-2782-17)* (Universidad Veracruzana, 2016).

2.4 Ensayo de desgaste

El método empleado para la determinación del desgaste fue del tipo pin sobre disco bajo la Norma *ASTM G99-05*, (Universidad Veracruzana, 2016). En términos generales el ensayo consiste en un pin el cual se coloca perpendicularmente a la otra probeta, generalmente un disco circular plano. El pin se presiona contra el disco a una carga específica. La máquina de ensayo permite que el disco gire y el pin presione el disco, como consecuencia se obtiene un camino o marca de desgaste sobre el disco.

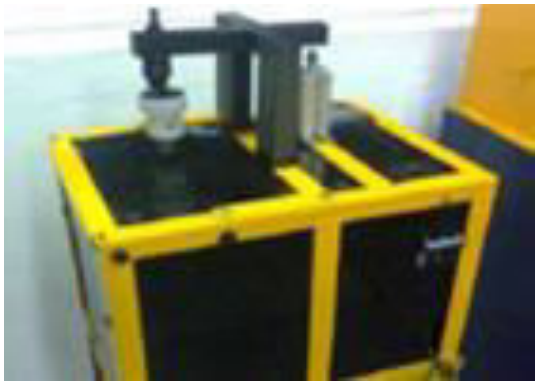


Fig. 2. Tribómetro pin sobre disco. Laboratorio de Tribología, FIME-Xalapa. Universidad Veracruzana (Fuente propia).

La máquina que se utilizó para estos ensayos es un tribómetro tipo pin sobre disco, del *Laboratorio de Tribología de la FIME-Xalapa* (Figura 2).

Los ensayos se realizaron de acuerdo con las condiciones indicadas en la tabla 1.

Tabla 1: Matriz Experimental.

CORRIDA EXP.	CARGA[N]	VELOCIDAD[RPM]
1	30	300
2	30	1000
3	100	300
4	100	1000

(Fuente propia)

3. RESULTADOS

3.1 Viscosidad

En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos de la medición de viscosidad.

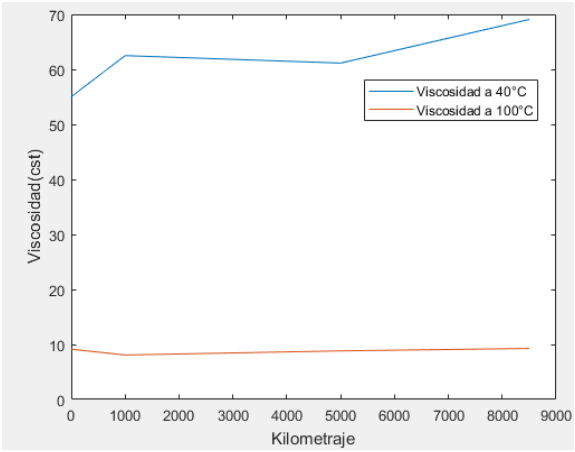


Fig. 3. Comportamientos de la viscosidad cinemática del aceite 20W50 a las temperaturas de 40°C y 100°C Vs. Kilometraje (Fuente propia).

De la figura 3, se resalta la gran diferencia entre los valores de viscosidad obtenidos a las temperaturas de 40°C y 100°C. El incremento de la viscosidad a 40°C es más notorio, conforme se incrementa el kilometraje de trabajo. Sin embargo, para el caso de la viscosidad a 100°C, prácticamente, la viscosidad permanece constante

independientemente del kilometraje y esto es lo deseado para garantizar una película lubricante entre los componentes a lubricar.

La temperatura de trabajo recomendada para el aceite lubricante en motores de combustión interna es en el rango de 90°c a 100°C y mientras más degradado se encuentre el aceite lubricante, retiene mayor calor y ese exceso de calor afecta al motor.

Conforme va trabajando el aceite lubricante dentro de la máquina, el aceite se va oxidando, cada vez más, y a su vez, se van generando más contaminantes, los cuales hacen que incremente su viscosidad.

3.2 Análisis de aceite lubricante

En la figura 4 se presentan los resultados obtenidos a través del analizador de aceites *Oilview Quick-check.*

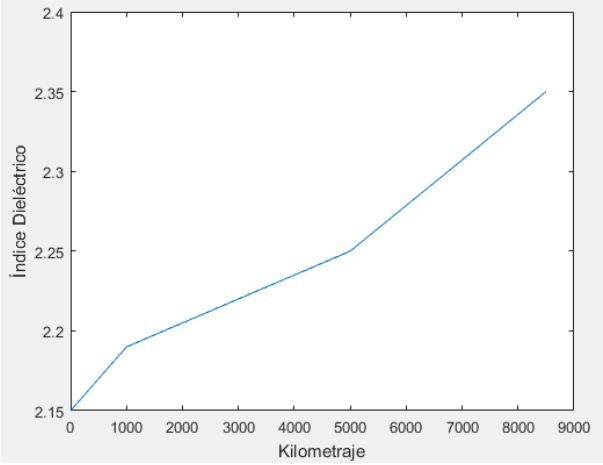


Fig. 4. Comportamiento del índice dieléctrico del aceite 20W50 Vs. Kilometraje (Fuente propia).

Como se muestra en la figura 4, el índice dieléctrico del aceite lubricante *SAE 20W50* se va incrementando conforme éste trabaja en el motor. Esto debido a que el aceite se va oxidando y degradando químicamente. A pesar de ello, en este ensayo no se encontró evidencias de partículas de desgaste, sólo se evidencia un desgaste químico del aceite lubricante por su uso.

3.3 Ensayos Timken

Todas las muestras de los aceites lubricantes ensayados cumplen con su desempeño lubricante adecuado, sin embargo, la resistencia al rompimiento de la película de estos varía dependiendo de las condiciones de carga y tiempo de su resistencia.

En la Tabla 2, se presentan los resultados obtenidos respecto del ensayo de rompimiento de la película lubricante del aceite *SAE 20W50* en sus diferentes condiciones de uso.

Tabla 2: Condiciones del rompimiento de la película lubricante del aceite 20W50 Vs. Kilometraje.

KILOMETRAJE[Km]	0	1000	5000	8500
Carga al rompimiento [Kg]	65	75	60	60
Tiempo del rompimiento [MINUTOS]	8:15	11:00	8:47	8:00

Se determinó que las condiciones del rompimiento de la película de las muestras correspondientes a un kilometraje de 0 Km (aceite nuevo) fueron a una carga de 65 Kg a un tiempo de 8:15 minutos y para las muestras a 8,500 Km el rompimiento de la película se presentó a una carga de 60 Kg en un tiempo de 8:00 minutos, lo cual refleja un ligero adelgazamiento de la película lubricante en las muestras de mayor kilometraje.

3.4 Ensayos de desgaste

De los resultados obtenidos en los ensayos de desgaste, (figura 5), se observa que el aceite a 0 Km fue el que presento el menor desgaste, esto debido a que no contiene presencia de contaminantes y se encuentra en estado de nuevo. En el rango de 1,000 km a 5,000 km, se observa que conforme el aceite se pone a trabajar llega a un momento en que optimiza su función lubricante, debido a que sus aditivos se activan de manera plena, lo cual corresponde a la vida útil del aceite lubricante. Después de 5,000 km, el aceite lubricante se va degradando, con su uso, hasta que sus aditivos se agotan y sus propiedades lubricantes

se pierden, presentándose un desgaste acelerado (8,500km).

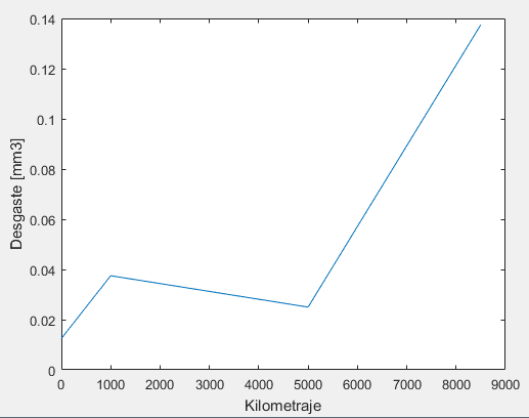


Fig. 5. Comportamiento del desgaste lubricado con aceite lubricante 20W50 Vs. Kilometraje. Ensayo pin sobre disco.

Con base en la información que nos ofrecen los ensayos tribológicos desarrollados en este trabajo, se propone el siguiente plan de mantenimiento automotriz:

1. Lo primero que se recomienda es realizar el cambio total del aceite lubricante del motor. Con el propósito de contar con una referencia de seguimiento para el mantenimiento, (0 Km).

2. Transcurrido el primer bimestre, se procede a realizar los ensayos tribológicos, como se indican en la figura 6. Viscosidad a 100°C, Índice dieléctrico, resistencia de película y desgaste.

3. En el segundo bimestre o posteriores, se propone realizar sólo el ensayo de viscosidad; si el resultado se encuentra dentro de los límites permisibles (8.40 cst -10.51 cst), se recomienda continuar utilizando el aceite lubricante, sin necesidad de realizar algún otro ensayo tribológico, y al siguiente bimestre comenzar con el paso 3; si no se cumple con los límites establecidos de viscosidad continuar con el paso 4.

4. Si el resultado del ensayo de viscosidad sale de los límites permisibles, se procede con la determinación del índice dieléctrico y continuar con el paso 5.

Numero de unidad:					
BIMESTRE	Viscosidad	Análisis de aceite	Timken	Pin sobre disco	Actividad especifica
	100°c	Dieléctrico	Desgaste Destructiva	1000 rpm a 30N	
PRIMER BIMESTRE					
SEGUNDO BIMESTRE					
TERCER BIMESTRE					
CUARTO BIMESTRE					
QUINTO BIMESTRE					
SEXTO BIMESTRE					

Fig. 6. Bitácora bimestral de mantenimiento automotriz (Olivares, 2016).

5. Si el resultado del análisis de aceite lubricante indica un incremento en el índice dieléctrico mayor a 0.03 comparado con el resultado del primer bimestre, realizar el paso 6; si el incremento del índice dieléctrico es menor a 0.03 se recomienda continuar utilizando el aceite lubricante, y en el siguiente bimestre comenzar en el paso 3.

6. Realizar el análisis de aceite, si los resultados muestran contaminación por agua, la actividad específica que se propone es cambiar el aceite lubricante inmediatamente y se procede desde el paso 1; pero si muestra degradación química, entonces, realizar el paso 7. En caso contrario, se seguir utilizando el aceite lubricante, y al siguiente, bimestre realizar el paso 3.

7. Realizar el ensayo Timken, si el resultado de la carga del rompimiento de película es menor a 60kg y el tiempo del rompimiento de película es menor a 8:00 minutos, realice el paso 8; si el rompimiento de película lubricante se alcanza a una carga mayor a 60 kg y a un tiempo mayor a 8:00 minutos, continuar utilizando el mismo aceite lubricante, y al siguiente bimestre comenzar en el paso 3.

8. Realizar los ensayos de desgaste pin sobre disco del aceite lubricante en función del bimestre, para evaluar el volumen de desgaste generado, si el volumen es mayor o igual a 0.0625 mm^3 se procede a remplazar el aceite lubricante; en caso contrario, se continúa utilizando el aceite lubricante.

4. CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos tribológicos de diferentes muestras del aceite lubricante *SAE 20W50* multigrado, utilizado en la lubricación de un motor de combustión interna de cuatro cilindros. Las muestras se obtuvieron bajo diferentes condiciones de uso: 0 km, 1000 km, 5000 km y 8500 km;

Se estableció una metodología de diagnóstico tribológico con base en cuatro ensayos, los cuales son: viscosidad, análisis de aceite, rompimiento de película y desgaste. Estos ensayos son útiles para establecer parámetros tribológicos del aceite lubricante y así poder determinar el estado de su vida útil.

Con base en esta metodología de diagnóstico tribológico, se propone un plan de mantenimiento automotriz, a través del cual se determine el momento justo y necesario para realizar el cambio del aceite lubricante del motor, optimizándose así, el desempeño del aceite lubricante y reduciéndose el volumen de aceite lubricante usado y los costos del mantenimiento.

RECONOCIMIENTO

Al personal de apoyo y adjunto del Laboratorio de Tribología de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Región Xalapa de la Universidad Veracruzana. Circuito Dr. Gonzalo Aguirre Beltrán, S/N, Zona Universitaria, Ciudad de Xalapa, Veracruz, México, por su disposición y apoyo para la realización de los ensayos tribológicos.

REFERENCIAS

Alvarez F, J. (2010). *Motores alternativos de combustion interna* (1 ed.). España: Upc.

Área tecnologica. (1 de Febrero de 2010). *Tecnología., de partes del motor*: http://www.areatecnologia.com/TUTORIALES/MOTOR%20DE%20COMBUSTION.htm (Consultado el 29 de Agosto de 2018).

Giacosa, D. (2000). *Motores endotérmicos.* España: Omega.

Lima, A. (14 de Mayo de 2016). *Doctor auto. mantenimiento previo automotriz*: http://www.doctorauto.com.mx/2016/05/14/mantenimiento-preventivo- automotriz/ (Consultado el 20 de Agosto de 2018).

Lublearn, Noria. (29 de Abril de 2016). *Cómo medir la viscosidad en aceites industriales*. ttp://noria.mx/lublearn/como-medir-la-viscosidad-en-aceites-industriales-y-de-motor/ (Consultado el 19 de Agosto de 2018).

Lublearn, Noria. (19 de enero de 2018). *Cómo determinar la calidad del aceite del motor*. http://noria.mx/lublearn/como-determinar-la-calidad-del-aceite-del-motor/(Consultado el 1 de septiembre de 2018).

Motor. (12 de noviembre de 2015). *El tiempo motor*:http://www.motor.com.co/actualidad/industria/respuestas-10-preguntas-comunes-lubricantes-motor/24222 (Consultado el 1 de septiembre de 2018).

Olivares, M. A. (2016). *Plan de mantenimiento automotriz basado en un diagnostico tribologico.* Xalapa, Veracruz. México: Universidad Veracruzana.

Universidad Veracruzana. (2016). *Manual de practicas del labortorio de tribología.* Xalapa, Veracruz. México: Universidad Veracruzana.

Widman International SRL. (24 de Agosto de 2018). *Mantenimiento proactico. Mantenimiento simple del auto para maximizar la Vida útil y minimizar costos*: https://www.widman.biz/mantenimiento/autos.html (Consultado el 1 de septiembre de 2018).

HACIA EL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA INDUSTRIA 4.0.

TOWARD MAINTENANCE FOCUSED ON INDUSTRY 4.0

MSc. Sara Yépez[*], PhD. Mary Vergara[*]
PhD. José Aguilar [**]

[*]**Universidad de Los Andes**, Facultad de Ingeniería, Dpto. Tecnología y Diseño.
Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Mérida, Edo. Mérida, Venezuela.
+582742402934.
E-mail: sarayepez@ula.ve; maryv@ula.ve
[**] **Universidad de Los Andes**, Facultad de Ingeniería, CEMISID.
Núcleo Pedro Rincón Gutiérrez, Mérida, Edo. Mérida, Venezuela.
+582742402845.
E-mail: aguilar@ula.ve

Resumen: En países de primer orden, se vienen implementando avances tecnológicos industriales de ingeniería remota e inteligencia artificial en equipos de sistemas automatizados e interconectados denominados Sistemas Ciberfísicos (CPS), apoyados en el Internet de las Cosas (IoT) y herramientas de Mantenimiento basado en la Condición (CBM). En Latinoamérica se dan vestigios en varios sectores, que indican que la "Industria 4.0", ha llegado, cuestionando el uso de estrategias de mantenimiento "tradicionales" y la accesibilidad para este contexto, de técnicas y estrategias de mantenimiento novedosas. La avanzada industrial, plantea la adaptación de tales tecnologías, que implican grandes inversiones, cambios de paradigmas y del "know how" industrial, así como de estrategias comerciales que respalden tales esfuerzos. Así, se realiza una revisión de los aspectos de mantenimiento que sustentan los cambios requeridos por la industria 4.0 y se genera una estructura inicial de gestión de mantenimiento para integrar esta realidad tecnológica.

Palabras clave: Industria 4.0, Mantenimiento, Adaptación tecnológica, Estructura de Gestión de Mantenimiento.

Abstract: In countries of first order, industrial technological advances of remote engineering and artificial intelligence are being implemented in equipment of automated and interconnected systems called Cyberphysical Systems (CPS), supported by the Internet of Things (IoT) and maintenance tools based on the Condition (CBM). In Latin America there are vestiges in several sectors, which indicate that "Industry 4.0" has arrived, questioning the use of "traditional" maintenance strategies and the accessibility for this context, of new maintenance techniques and strategies. The industrial advanced, raises the adaptation of such technologies, which involve large investments, changes of paradigms and industrial "know-how", as well as commercial strategies to support such efforts. Thus, a review is made of the maintenance aspects that support the changes required by Industry 4.0 and an initial structure of maintenance management is generated to integrate this technological reality.

Keywords: Industry 4.0, Maintenance, Technological Adaptation, Estructure of Maintenance Management.

1. INTRODUCCIÓN

En busca de la competitividad en el mercado de participación, las empresas del entorno global, han tenido que dar el paso hacia la virtualización de la automatización y la robotización, generando la oportunidad de producir variedad en masa, a bajos costos y en tiempos breves (CEPAL, 2018). Esto, para satisfacer, los intereses de los clientes cada vez más exigentes, buscando personalización en sus productos, además de valores agregados e innovaciones (Fajardo, 2018).

La incorporación de nuevas tecnologías ha implicado inversiones considerables que los clientes están dispuestos a pagar. Así, empresas como Siemens en Alemania, han introducido en sus procesos y productos, softwares, dispositivos inteligentes y elementos, que posibilitan la conectividad y comunicación entre los mismos, ciertamente de costos considerables en el inicio, pero con capacidades de respuesta que le han permitido captar nuevos clientes, al posibilitar productos únicos en tiempos oportunos (Siemens. The Magazine, 2017).

La concepción de la *Inteligencia Colectiva* entre los activos de un sistema de producción, ha generado, en conjunto con otros aspectos, a la denominada Industria 4.0 o Fábrica Inteligente, a partir de la Computación en la Nube, como servicio de virtualización, que hace posible la transferencia de forma simultánea, de los datos operativos de los activos de tal sistema, al igual que el procesamiento y control de los mismos, a altas velocidades y en grandes cantidades, para orientar la toma de decisiones tanto de la producción como de mantenimiento de los activos (Joyanes Aguilar, 2011).

De lo anterior destaca, que la Computación en la Nube, surge a partir de las tecnologías disruptivas, como la web en tiempo real, la geolocalización, la realidad aumentada que genera la gestión del conocimiento, el Internet de las Cosas (IoT) y de los Servicios (IoS), además de la estandarización de lenguajes de programación como el HTML, que han hecho de ésta, un medio cada vez más necesario, para el avance de las organizaciones, empresas e individuos (Joyanes Aguilar, 2011).

Así, el desarrollo de dispositivos inteligentes y de tecnología móvil, han contribuido a la virtualización y posibilitado procesos de producción más flexibles, adaptados a los requerimientos de los clientes con arquitecturas de planta flexibles y procesos de mantenimiento, eficientes, confiables, económicos y con activos con ciclos de vida largos (García et all, 2018). En la Fig. 1, se muestra la concepción de la Industria 4.0 y de los elementos característicos de la misma.

La evolución vertiginosa de la tecnología, ha cambiado la concepción del mantenimiento de los equipos y sistemas, que hacen posible la "transformación". En este sentido, el mantenimiento de activos, apoyado en labores rutinarias y preventivas sustentadas en filosofías de mantenimiento de clase mundial y de mantenimiento total productivo, quedó rezagado ante la disposición de herramientas de gestión del mantenimiento (GMAO) y de varios tipos de mantenimiento aplicados en un mismo periodo laboral, prevaleciendo el mantenimiento predictivo.

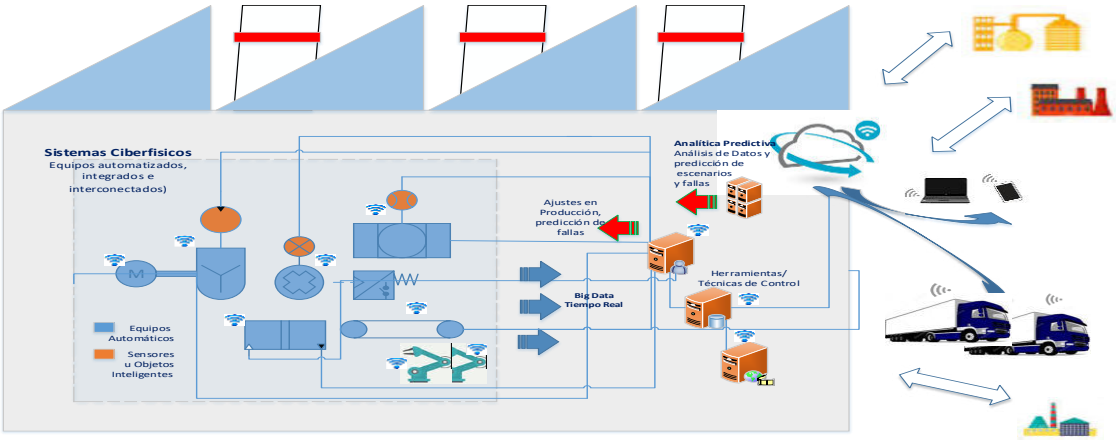


Fig. 1. Elementos característicos de la Industria 4.0. Fuente: Propia.

De hecho, un estudio realizado recientemente en España, confirma que el 93% de los responsables de la industria del automóvil (sector donde históricamente, inicia la introducción de cambios tecnológicos), considera imprescindible el mantenimiento predictivo apoyado en equipos y dispositivos de monitorización en tiempo real, para la planificación de las actividades (Iglesias Fraga, 2018).

Así, ha surgido, el Mantenimiento por Condición en equipos y sistemas conectados, proporcionando información constante sobre el estado operativo de los mismos, base para el análisis multi-paramétrico y la planificación de rutas de inspección y acciones, constituyéndose como una metodología que garantiza las condiciones de diseño de los activos y propicia la confiabilidad y disponibilidad continua de los mismos (Sanchez, 2016).

El desarrollo de tecnologías de mantenimiento predictivo y autonómico como la Prognosis del Estado de Salud del Equipo (PHM), colaborativo en la disposición de equipos interconectados en sistemas autonómicos, y sustentado en "objetos inteligentes" (Guillén, Crespo, Macchi, & Gomez, 2018), ha constituido un soporte de relevancia para las nuevas exigencias de manufactura, al permitir detectar de forma anticipada, por el comportamiento de los datos, condiciones operativas anómalas, que en la nube se van simulando como escenario posible (Gemelo Virtual), para llegado el caso, ajustarse y continuar operando o auto-configurarse, para posicionarse fuera de servicio (Lee & Bagheri, 2015).

Todo esto traducido, en ahorro de costos, por la precocidad de la detención de fallas y, en mayor productividad, al posibilitar equipos y activos de forma ininterrumpida y confiable. Incluso esto, orienta el reemplazo oportuno de activos, de acuerdo a una medida de cambio, producto de la compilación y análisis de datos (Gage, 2013).

Así, apuntando todas las herramientas tecnológicas, que se disponen en el campo del mantenimiento, para garantizar procesos seguros y continuos, en sistemas conformados por equipos interconectados y comunicados, se detalla en la Figura No. 2, la evolución de la producción y el mantenimiento, que ha derivado la denominada Industria 4.0, destacando que tales avances no han sido asumidos he implementados globalmente, al mismo tiempo ni a la misma velocidad.

2. ¿ESTÁ LATINOAMÉRICA ADOPTANDOLA INDUSTRIA 4.0?

La Cuarta Revolución Industrial, ha generado cambios relevantes en el mundo industrial y empresarial, pues ha posibilitado la recuperación en Europa y Estados Unidos de gran parte de la industria, casi extinguida por la competencia avasalladora de las empresas asiáticas, con la inclusión de la tecnología digital (Galvan M, et all, 2017). La incorporación de tal tecnología en esos países, para convertir sus procesos en fábricas inteligentes, y su sector industrial en un sector interconectado, les ha dado resultado.

Sin embargo, al igual que en las pequeñas y medianas empresas de los países de primer orden (Siemens. The Magazine, 2017), en Latinoamerica el retraso de la adopción de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), ha ralentizado el proceso de familiarización y adaptación a las nuevas tecnologías productivas, rezagandola en la competencia mundial, principalmente por problemas de tipo económico-organizacional y políticas públicas (Valente, 2018). Las empresas de algunos países de la región apenas comenzaron hace un par de años en transformar sus negocios tradicionales, con la utilización de herramientas digitales, y a pesar de la poca maduración cultural y tecnológica, muchas ya se encaminaron, automatizando los sistemas de producción e incorporando inteligencia artificial para la toma de decisiones (Fajardo, 2018).

Tal como referencia Gonzalez Torres (2017), de acuerdo a SAP Latinoamérica, son los empresarios y emprendedores los protagonistas de la revolución industrial, a través del entendimiento de que, la incursión en mercados nuevos prometedores en tiempos actuales, radican en la inversión en tendencias tecnologicas digitales que incluyen además de lo ya mencionado, sensores, robots, impresoras 3D, entre otros, para el mejor aprovechamiento de los recursos de los modelos de negocios que manejan, así como el impulso de la economía colaborativa.

En la publicación de Basco (2018), se reseña que en la región, la cuarta revolución industrial está presente desde hace años en la Industria del Petróleo y Gas, donde las TIC de acceso local y remoto se han constituido en elementos fundamentales en los procesos de producción, control y mantenimiento, bajo normas específicas, asegurando los niveles de eficiencia y confiabilidad

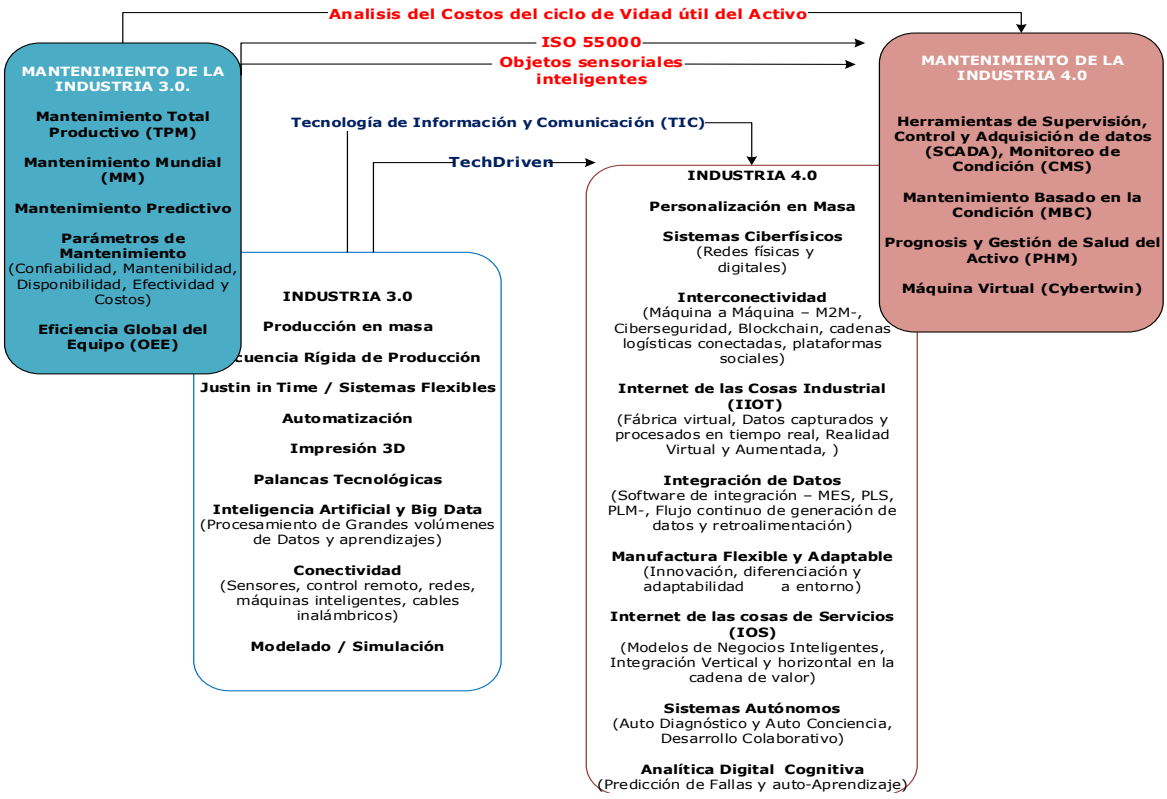


Fig. 2. Migración tecnología de la 3ra Revolución Industrial a la Industria 4.0. Fuente: Propia.

que exige el mercado del sector (García et all, 2018).

En otro reporte emitido por la CEPAL (2018), se estima que se genere crecimiento económico en paises de Latinoamérica, con interes de repunte, por la incorporación del "internet de la producción" y por la creación de fondos públicos y privados para apoyar procesos de emprendimientos tecnológicos, desde la etapa temprana hasta el escalamiento, permitiendo incorporar el IoT, como elemento clave de las actividades económicas (Guzman, 2018). Sin embargo, también destaca que las políticas públicas de poca apertura técnológica en algunos paises, propicia que esta revolución industrial, se tarde unos años más en llegar a los mismos.

De igual manera, en el estudio de Gonzalez Torres (2017), se destaca que la Multinacional tecnológica Citrix (líder en tecnologías de virtualización) reporta que muchas compañías latinas están implementando estrategias de movilidad, con la Integración de los dispositivos (celulares, tabletas, computadoras portátiles) de los empleados, para el manejo de las operaciones diarias de sus procesos, de forma remota y confiable, disminuyendo costos fijos de instalaciones y de energía en un 78% e incrementando la productividad de los mismos, en un 89%. Así, según reporte del Congreso de la Industria Conectada de España (2018), se verifica que en la región, para finales del 2016, el índice de digitalización alcanzó un incremento mínimo (1%), que representó un incremento de 0,32% en el producto bruto interno global de la región, 0,26% en la productividad laboral, 0,23% en la productividad multifactorial y 0,09% en la contribución de las TIC a la productividad laboral. Igualmente, en el informe de la Cepal, se refiere que los países de América Latina, con mayor repunte tecnológico en la Industria 4.0., son en ese orden, México, Brasil, Chile, Argentina y Colombia, en gran parte por la penetración de las TIC en los mismos y por el impacto económico que ésta ha generado en tales.

En este particular, finalmente, se menciona el

trabajo realizado por la empresa The Boston Consulting Group (BCG), junto al Ministerio de Producción de Argentina, en el cual se calificaron a la empresas de acuerdo al grado de transformación tecnológica. Así, se propone como se evidencia en la Fig. 3, adicionar dos aspectos para el baremos de la empresas, como son el grado de penetración de las TIC y la Conectividad (que posibilita la comunicación entre equipos conectados, el personal técnico de operación y mantenimiento y la red de suministro) y, la adopción de herramientas de analítica y de inteligencia de negocios (que hace posible el manejo e intepretación de los datos generados por los equipos, sistemas y procesos). Se plantean tambien, cuatro sectores como la idea inicial de BCG pero siguiendo referencias de Toda (2017), donde se destaca un sector A, para las empresas que estan "Estancadas en modelos tradicionales", un Sector B, para aquellas que estan Innovando en el Paque Industrial, un Sector C correspondiente a las empresas que estan Haciendo Retrospectiva de data (analítica descriptiva y diagnóstica) y por último, un Sector D para las empresas que estan en Vías de la Virtualización, prediciendo Data y generando ideas de solución.

Conviene resaltar, que las áreas de apoyo de la producción de la Industria 4.0, como el mantenimiento, aseguramiento de la calidad y otros, son afectadas también por las carencias tecnológicas y limitaciones organizacionales y del entorno.



Fig. 3. Matriz de Clasificación de Empresas según Adopción de Industria 4.0. Fuente: Propia.

3. MANTENIMIENTO 4.0 EN LA REGIÓN: ¿QUÉ PROBLEMAS DEBE RESOLVER?

En los países donde la Industria 4.0 ya se ha instalado, las estrategias de fiabilidad y el mantenimiento predictivo han destacado, a partir del monitoreo de condición (PREDITEC, 2017). El mantenimiento actual, se enfrenta al rigor que implica el manejo "novedoso" de equipos, sistemas automatizados y dispositivos inteligentes interconectados y comunicados entre sí, (Alvarez Laverde, 2016), que sufren en el mundo físico, fallas, desgastes, diminuciones de desempeño, entre otras anomalías y, que reportan en el mundo digital, una cantidad masiva de datos sobre sus estados operativos individuales y colectivos, que analizados oportunamente, ayudan a resolver los problemas del mundo físico.

Esta simultaneidad de "escenarios de trabajo", le es común a todas las empresas que se han embarcado en la cuarta revolución industrial, sea cual sea el contexto regional. Así, teniendo en cuenta, que en Latinoamérica se suman algunas limitaciones a superar en comparación con los países de primer orden, por el "reciente" conocimiento de la Industria 4.0, se determina en primer lugar que la principal barrera de entrada hacia la virtualización y digitalización de los procesos de producción, al igual que en el mantenimiento de ésta industria, corresponden a *la falta de conocimiento* de la misma (SIEMENS Mesoamérica, 2016).

En este aspecto, el limitado manejo de información sobre esta nueva tendencia (tanto dueños de negocios, como gerentes y operarios), desperdicia el potencial que representa la comprensión en tiempo real de los factores que afectan el rendimiento y uso de un activo y por ende, contribuye a que no se hagan esfuerzos por renovar los parques industriales con las nuevas tecnologías que ofrece el mercado, y más aún, por adquirir las capacidades analíticas que implica, en parte por el costo que representa la renovación tecnológica y por la concepción en sí, de la tecnología implícita.

La transformación del modelo de negocio (del proceso semi-mecanizado o mecanizado a automatizado interconectado) supone inversiones de gran cuantía, por la adquisición de equipos de avanzada tecnológica, dispositivos inteligentes, sistemas de control y conexión, instrumentación digital y otros; sin obviar los cambios de planta física, de tipo organizacional y de formación/ capacitación del personal (Iglesias Fraga, 2018). Las inversiones necesarias, en muchas de las empresas de la región (representada en su mayoría por Pymes) no pueden realizarse, a la misma velocidad con que avanza esta revolución tecnológica, por no disponer recursos propios ni

incentivos gubernamentales para desarrollar tecnología. Vale decir, que solo en los cinco países de mayor penetración de las TIC (antes expuestos), es donde se están comenzando a generar planes de crecimiento tecnológico con fondos públicos y privados que proponen tasas de interés bajas y plazos cómodos de pago (CEPAL, 2018).

Subyacente a esta falta de conocimiento, se descubre una *resistencia a la Cultura Digital*. Ese paradigma o temor a enfrentarse a cambios de los modelos de negocios tradicionales a digitales y todos los esfuerzos que implican, limitan a escépticos, dar el salto definitivo a ésta nueva era industrial, por tratarse de una fabricación aditiva (3D), descentralizada y autónoma, en un entorno donde se manifiestan pocos conocedores del mundo digital (Pierano, 2018).

De igual manera, el *Soporte Técnico y Tecnológico* de los sistemas ciberfísicos y el mundo digital, constituye una restricción, en lo que, a disposición de piezas y componentes electromecánicos y electrónicos se refiere, hardware y softwares de apoyo, respaldo y de actualización, al igual que instrumental de medición de parámetros y mano de obra técnica especializada, si no se tiene la previsión de niveles de inventarios mínimos y de solución operativa digital. Este aspecto, dificulta las labores de reposición y restauración de equipos automatizados y de sistemas de gestión en condiciones de falla, por no disponerse a corto alcance la solución, generando tiempos muertos, y situaciones "fuera de servicio". Ello, considerando que la producción y "construcción" de los mismos se encuentra en otras latitudes, y hay limitada inversión de los proveedores en bienes de capital, en electrónica y software (Pierano, 2018)

Otro aspecto causal, que limita las labores de mantenimiento lo constituye el grado de *Complejidad tecnológica* que en muchas ocasiones representan las nuevas tecnologías, por no contarse con interfaces operativas de softwares comunes, por falta de la estandarización de los datos que se maneja y por protocolos restringidos de conectividad (CEPAL, 2018). En ese mismo ámbito, se ubica en este aspecto la interpretación de la Big Data generada en el desempeño productivo, a partir de modelos de optimización de tiempos de remplazo y tiempos de inspección con métodos de investigación operacional y optimización estadística, que requiere de la pericia y conocimientos de la Ingeniería de Mantenimiento, para establecer las actividades de mantenimiento, ya sea de forma autonómica (mediante inteligencia artificial) o simplemente programada (Roy, 2018). De esto se precisa, que muchas empresas ni siquiera tienen debidamente generado el mapa de datos de los procesos y menos, los indicadores de producción y mantenimiento para utilizarlos en técnicas de control de datos o algoritmos analíticos (Renancio, 2017). Sin obviar, el acceso limitado a desarrollos programáticos de aplicaciones validadas para el manejo de datos, por la poca producción de estas tecnologías en la región y por los costos de adquisición.

De todas las causas analizadas anteriormente, surge un término común, como lo es el conocimiento y la gestión del mismo. Por su parte, el conocimiento digital supone entonces, la formación y capacitación de personal técnico especializado, en los diferentes niveles de la pirámide de automatización. Sin obviar. la gestión del conocimiento experto del personal que tiene un camino recorrido sobre los procesos y las etapas de transformación que debe mutar hacia nuevos "modus operandis" del mismo principio mecánico (Pruisán & Valdés, 2017).

Destaca igualmente, otro aspecto de gran relevancia, como es la necesidad de *Conectividad*, para registrar en tiempo real datos e interpretarlos de forma inmediata de modo que se puedan realizar ajustes oportunos y adecuados y los procesos no se detengan. En Latinoamérica, ésta necesidad no es satisfecha ampliamente, por la baja penetración de internet en la región, pues de acuerdo a un estudio desarrollado por DHL, el Índice de Conectividad Global (GCI, por sus siglas en inglés), evidencia un claro retraso en el tráfico de datos comerciales, destacando Panamá como el país latino con las mejores condiciones de conectividad (puesto 42), siguiendo México puesto arriba de Chile (53), Brasil (57) y Perú (64). Mientras que Colombia y Argentina aparecen más atrás en los puestos 88 y 102 respectivamente (González Torres, 2017).

De lo anterior, se derivan inconvenientes para el

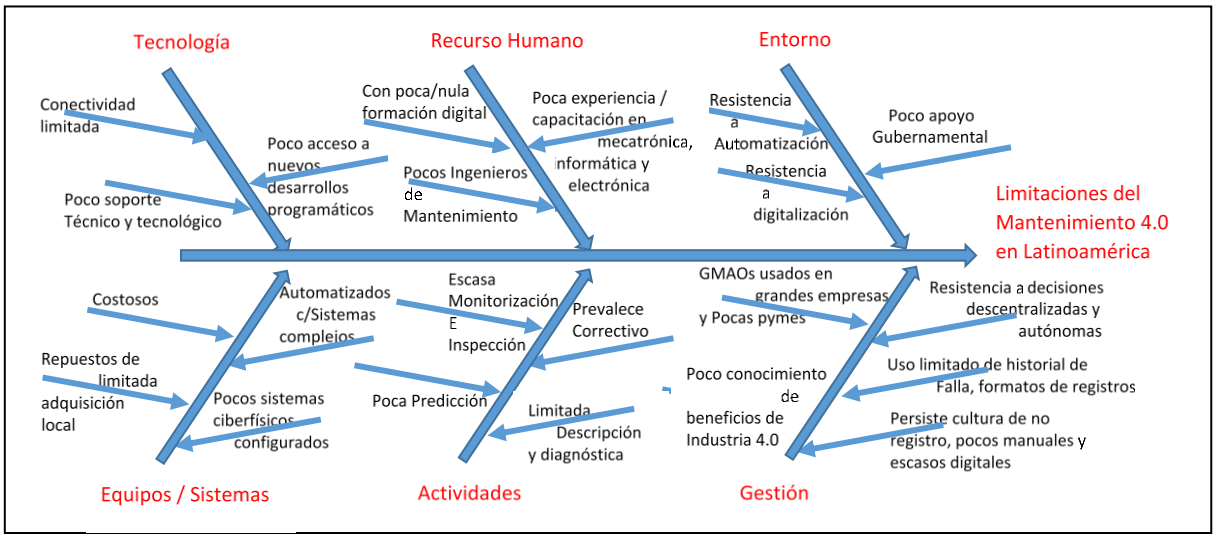


Fig. 4. Diag. Ishikawa de las limitaciones del Mantenimiento 4.0 en Latinoamérica.
Fuente: **Ishikawa (2013).**

logro de los objetivos en la gestión de mantenimiento, debido a los problemas de velocidad, tiempos de respuesta, verificación de generación de data en tiempo real, revisión de procesamiento de datos y control de calidad en todos los procesos de mantenimiento.

Por otro lado, y en otro orden de ideas, vale acotar que en la región sigue prevaleciendo el mantenimiento correctivo como primera opción de restauración de un equipo. El mantenimiento preventivo, apenas se esta implantando y el predictivo no es frecuente ni común, por contemplar instrumentos y técnicas costosas. Además, se siguen realizando registros de todas las actividades en lapiz y papel, y pocas de estas se registran en la computadora. La gestion del mantenimiento por su parte, aún se realiza a través de ordenes de trabajo manuales y programadas en planes de mantenimiento que no se van ajustando por falta de manejo constante del historial de mantenimiento, indicadores de mantenimiento de los equipos ni contemplando los cambios en los parámetros de producción. El uso de sistemas automatizados de gestión (GMAO -Gestión de mantenimiento asisitido por ordenador-), se verifica en las grandes empresas y en muy pocas pymes.

En fin, en lo que a la problemática que enfrenta el mantenimiento de Industria 4.0 en los países latinos se refiere, debe reseñarse que en primer lugar, deben superarse las prácticas de mantenimiento pasadas incluso en los parques mecanizados, y luego vencer la resistencia a la renovación tecnológica. A todo lo anterior, debe complementarse, que las empresas latinas que ya han instalado la cuarta revolución industrial, apenas se están familiarizando con la tecnología digital y sus beneficios en el proceso de transición que supone el cambio tecnológico, y la disposición de data actualizada constantemente sin siquiera registrarla y analizarla. En la Fig. 4, se detalla el Diagrama de Ishikawa que recoge la problemática del mantenimiento 4.0, de la Industria 4.0 en Latinoamérica.

A partir de lo anterior, se plantea el Análisis FODA al mantenimiento de la Industria 4.0,, para generar estrategias que contribuyan a solventar las causas del problema que se enfrenta y se den, en plazos más breves los cambios tecnológicos requeridos para fortalecer el mercado económico de la región. Por su parte, el análisis considera a lo interno las fortalezas y debilidades de la región para la implantación del mantenimiento 4.0, tanto en lo público como en lo privado, y en lo que corresponde al análisis externo, se contemplan las oportunidades y amenazas del entorno, de los mercados foráneos y de la competencia que plantea disponer las tecnologías modernas. La fig. 5, muestra a continuación, la matriz resultante, donde se verifican, a partir de escenarios combinados

ANÁLISIS EXTERNO / ANÁLISIS INTERNO		OPORTUNIDADES O.1. Reportes tecnológicos de la CEPAL enterando a autoridades, sobre necesidades de la región O.2. Asoiaciones de Profesionales y empresarios interesados en desarrollo de parque tecnológico O.3. BID interesado en desarrollo económico de la región a partir de la Industria 4.0. O.4. Financiamiento gubernamental a tasas bajas y medianos plazos O.5. Interés de instituciones públicas y privas en Capacitar/Formar personal técnico y mano de obra calificada en la Industria 4.0. O.6. A.5. Carreras universitarias y técnicas en áreas de formación de la Industria 4.0.	AMENAZAS A.1. Cambios vertiginosos tecnológicos A.2. Incipiente apoyo gubernamental A.3. Mercado de competencia global,actualizado A.4. Políticas públicas, tecnológicas y financieras de la región limitadas para cambios tecnológicos
FORTALEZAS	F.1. Conocimientos técnicos de operación y mantenimiento de equipos F.2. Gestión de conocimiento basado en experencia F.3. Plantas físicas aptas para modernización	E1. Formación/Actualización de personal técnico en equipos automatizados E2. Conformación de equipos de trabajo para la actualización. E3. Estudios de Factibilidad Técnica y Económica de remodelaciones de plantas físicas E4. Realizar adecuaciones de la planta física con capital público E5. Formación Técnica en Industria 4.0	E6. Charlas institucionales-gubernamentales sobre Industria 4.0. E15. Desarrollo de Protocolo de Adecuación/Transición a Industria 4.0. E16. Charlas institucionales/gubernamentales de Mercado Global sobre tendencias tecnológicas y de nuevos productos E17. Promover reuniones entre institucones, camaras empresariales y gobierno sobre Apertura Tecnológica y Conectividad
DEBILIDADES	D.1. Poco conocimiento empresarial sobre Industria 4.0 D.2. Resistencia Cultural sobre Industria 4.0. D.3. Conectividad Limitada D.4. Alta Mecanización Poca Automatización D.5. Poco Soporte Técnico y Tecnológico para sistemas ciberfisicos D.6. Prácticas de mantenimiento tendentes al correctivo D.7. Prevalece cultura de No Registro / Pocos GMAOS D.8. Poco conocimiento del personal técnico y operativo en sistemas ciberfisicos	E6. Charlas institucionales-gubernamentales sobre Industria 4.0. E7. Promover reuniones con Gobierno nacional para dar apertura a empresas de servicios de conexión de banda ancha E8. Invertir en conexiones G4 y conocer requerimientos para G5 E9. Estudios de Factibilidad Técnica y Económica de Automatización/Incorporación de elementos inteligentes(Configuración Sistemas Ciberfísicos E10. Adquisición de equipos automaticos, sensores inteligentes y componentes de sistemas de interconexión E11. Promover en proveedores inversiones de capital en electrónica/sofwares y servicios digitales E12. Charlas de promoción de mantenimiento predictivo, preventivo y basado en la condición E13. Desarrollo de estructura de sistemas de gestión ajustado a renovación tecnológica E14. Desarrollo de GMAO E15. Desarrollo de Protocolo de Adecuación/Transición a Industria 4.0.	E6. Charlas institucionales-gubernamentales sobre Industria 4.0. E7. Promover reuniones con Gobierno nacional para dar apertura a empresas de servicios de conexión de banda ancha E18. Promover políticas financieras para la adquisición de equipos, adquisición de plataformas tecnológicas en proveedores inversiones de capital en electrónica/sofwares y servicios digitales E19. Promover relaciones bilaterales tecnológicas entre gobierno y paises impulsadores de Industria 4.0. E20. Promover la conformación de políticas de regionales para el impulso de todos los paises en la implantación de la Industria 4.0.

Fig. 5. Matriz FODA del Mantenimiento 4.0. en Latinoamérica. Fuente: Ponce Talancon (2007).

las estrategias a aplicar, de conveniencia.

4. PROTOCOLO DE ADECUACIÓN/ TRANSICIÓN A LA INDUSTRIA 4.0.

Luego de haber establecido el estado del arte de la Industria 4.0 en Latinoamérica y del análisis situacional del Mantenimiento que le da soporte, se realiza un aporte prospectivo al proceso de transición hacia el mantenimiento 4.0, como contribución al proceso de adopción y adaptación a esta nueva revolución industrial.

De esa manera, y teniendo en cuenta las estrategias generadas en la Matriz FODA, se desarrolla la correspondiente, al Protocolo de adaptación y migración de la tecnología industrial tradicional a la Industria 4.0, contemplado pasos a seguir, en tres niveles, que abarca también las otras estrategias resultantes:

Nivel Macroempresarial: Dirigido a los gobiernos de la región latinoamericana e instituciones relacionadas con el entorno empresarial e industrial:

- Generar la Apertura tecnológica gubernamental, que estimule el ecosistema digital, la conectividad y evite la obsolescencia de los parques industriales y empresariales.
- Disponer políticas macroeconómicas estables que favorezcan el financiamiento para reinversión y adaptación tecnológica, acompañadas de tasas de bajas y plazo a mediano plazo.
- Propiciar, junto a las asociaciones de empresas e industrias nacionales, el empoderamiento de los

cambios tecnológicos y de conocimiento de tecnología virtual que demanda el mercado internacional para superar la frontera tecnológica.

- Fomentar el desarrollo de empresas generadoras de servicio digital, productoras de innovación, base para las industrias usuarias de nuevas tecnologías y soluciones productivas (Pierano, 2018).
- Fortalecer las cadenas de suministro (proveedores y clientes) tanto de grandes empresas y pymes con instituciones públicas y de servicios de acceso técnico y profesionales, a través de convenios para generar mayor valor agregado y reconocimiento internacional.
- Generar medios educativos y de adquisición de nuevos conocimientos tecnológicos a partir de campañas impulsadas por las Instituciones Gubernamentales de Ciencia y Tecnológica de los países de la región latinoamericana, para fomentar la Gestión de Conocimiento como fortaleza base de la evolución tecnológica (CAMCHAL, 2017).

Nivel Microempresarial: Acciones orientadas a las empresas de producción de bienes y servicios:

- Considerar la adaptación de sus negocios tradicionales a los modelos de negocios digitales, descubriendo y explotando nuevas necesidades, generados por la incorporación de la tecnología digital y virtual, y la inteligencia artificial autonómica.
- Evaluar técnica y económicamente la Transformación Tecnológica sobre el modelo de negocio particular y del mercado de suministro (SIEMENS Mesoamérica, 2016).
- Solicitar apoyo financiero gubernamental o a instituciones internacionales promotoras de la implantación de la Industria 4.0 (ejemplo: BID).
- Adquirir equipos automatizados y elementos de configuración de los sistemas Ciberfisicos, considerando alianzas con empresas internacionales que faciliten además el proceso de inducción.
- Reconfigurar las plantas industriales, basadas en las combinaciones y arreglos dinámicos de los distintos sistemas y procesos internos de producción tecnológica, de avanzada que le permitan "ordenarse y alinearse" con otras empresas para anclarse en los mercados conocidos y avanzar a otros segmentos (Pierano, 2018).
- Formar el personal de mayor talento en desarrollo de tecnologías digitales, que permita la disposición de mano de obra especializada y capacitada como ventaja organizacional.
- Consolidar cadenas de suministros de mayor integración, con empresas complementarias, propiciando el desarrollo de métodos colaborativos, de plataformas de involucramiento, incluso con empresas pares.

Mantenimiento de Sistemas Ciberfisicos interconectados:

- Evaluar técnica, logística y económicamente la incorporación de equipos automatizados, la condición de rediseño automatizado de equipos para prolongar su vida útil, y la sustitución de equipos operativos a otros procesos.
- Invertir en plataformas digitales y softwares concebidos en la Computación en la Nube, para manejar datos simultáneos, en tiempo real y en gran cantidad, de los equipos y sistemas de producción, apoyo y mantenimiento de los mismos.
- Adquirir e incorporar equipos automatizados y objetos inteligentes de detección y captación de datos operativos propios de los equipos enlazados, datos del proceso o la línea, que alimenten softwares especializados en analítica de datos.
- Formar personal técnico en mecatrónica, informática y electrónica, de acuerdo a los requerimientos de equipos automatizados, conectados y autonómicos.
- Contar con personal formado en Ingeniería de Mantenimiento, que anticipe pérdidas por indisposición de equipos degradados, condiciones de falla, y estados operativos anómalos. Con conocimiento en métodos de prognosis, de salud, del equipo/maquinaria y en métodos de evaluación de degradación de vida útil.
- Replantear los talleres de mantenimiento, adquiriendo instrumentos de medición, captura y detección de parámetros operativos de equipos así como bancadas de prueba, softwares de corrida y testeo de equipo, al igual que herramientas y consumibles para piezas electromecánicas y electrónicas.
- Configurar una Estructura Inicial de Gestión de Mantenimiento, apoyado en el Mantenimiento Basado en Condición, Predictivo y Autónomo, para propiciar la cultura de anticipación de ocurrencia de fallas y de mejora continua, tal como se verifica en la Fig. No. 6. Tanto el protocolo como la estructura inicial propuesta, son válidos en cualquier ámbito industrial, contemplando lapsos de implementación entre 2 y 3 años.

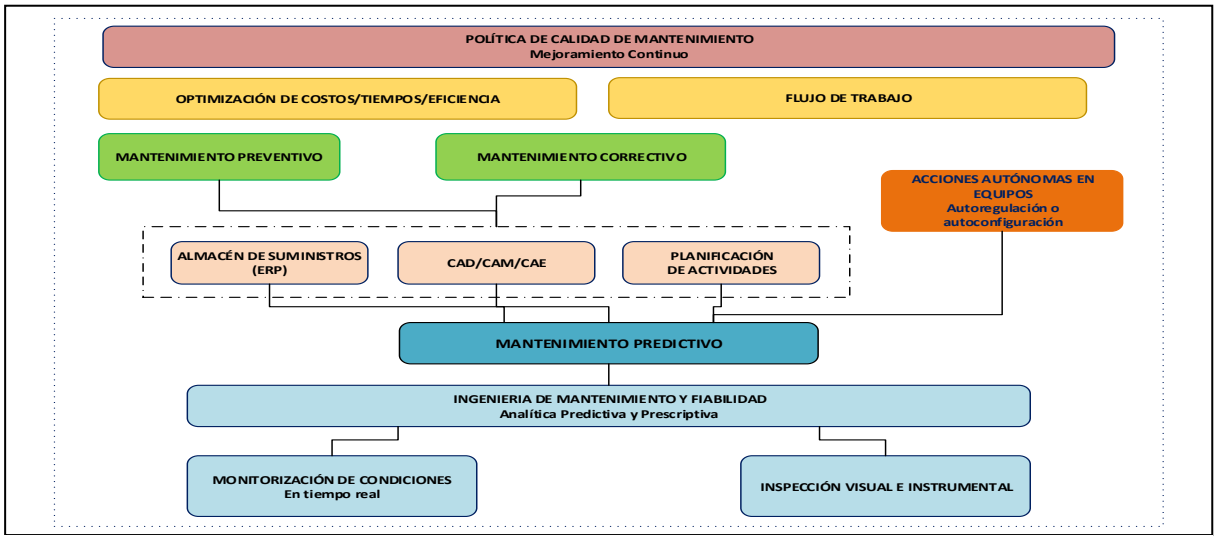


Fig. 6. Estructura Inicial de Gestión de Mantenimiento de la Industria 4.0. Fuente: Propia.

4. CONCLUSIONES

La industria 4.0 es un hecho global que aún en América Latina, se demora. Un porcentaje pequeño de empresas, ya están operando en las nuevas condiciones digitales y virtuales de trabajo, sabiendo el resto que aún no realiza el cambio, que está obligado a dar el salto para no perder el espacio de mercado mundial que han ganado, e incluso para superar y abarcar nuevos. Una gran mayoría, apenas se ésta enterando de ésta revolución industrial, entendiendo que el proceso de renovación implica transformaciones que involucra a todos los actores y procesos de la cadena económica de cada país. Gobiernos, empresas y trabajadores deben asimilar este nuevo panorama, como una exigencia que debe darse en un lapso corto y estar dispuestos, a participar en la avanzada tecnológica.

En igual condición se ubica el proceso de mantenimiento de esta industria, pues en aquellas empresas donde ya se aplican acciones generadas por la analítica predictiva aún se están haciendo ajustes culturales, laborales y técnicos en pro del beneficio de las bondades de los recursos digitales. El estado rudimentario de muchas plantas industriales en lo que a producción y mantenimiento se refiere, demanda urgentemente que la adecuación sea concebida de forma inmediata para no distanciarse de las empresas nacionales y regionales que ya están montadas en el avión de la tecnología 4.0. El mantenimiento de la Industria 4.0, asegura mediante la predicción de fallas, la disposición de equipos cuando operación los requiera, en las condiciones operativas y de volumen que el mercado demande, apoyado en un personal capacitado en herramientas digitales, estadísticas y de prospección para garantizar empresas eficientes, flexibles, competitivas y previamente testeada en el mundo virtual, pero para ello deben darse los pasos de renovación industrial. Ésta investigación, propone a futuro, el desarrollo de planes de actividades de implementación de los pasos de adecuación propuestos para hacer del protocolo un instrumento más ejecutable.

REFERENCIAS

Alvarez Laverde, H. (2016). *Ceroaverias: El mantenimiento para la era de la Industria 4.0.* Apsoluti Empresas.

Basco, A. (2018). *Industria 4.0 fabricando el futuro.* IDB Publications.

BID. (2018). *ConexionINTAL: Industria 4.0 fabricandofuturo.*http://conexionintal.iadb.org/2018/08/07/ industria-4-0-fabricando-el-futuro-2/

CAMCHAL. (2017). *Cámara Chileno-Alemana: Para esta revolución digital, el capital humano es la piedra angular de la transformación.* https://chile.ahk.de/es/publicaciones/publicaciones-camchal/articulos-y-entrevistas/innovacion/innovacion-desde-la-rueda-hasta-industria-40/

CEPAL. (2018). *La nueva revolución digital*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38604/S1600780_es.pdf

Congreso de Industria Conectada de España. (2018). *El desafío de la cuarta revolución industrial en América Latina.* https://cic40.es/el-desafio-de-la-cuarta-revolucion-industrial-en-america-latina/

Fajardo, D. (2018). *LT PULSO.: Manufactura: el principal objetivo de la 4ta Revolución Industrial.*

Gage, M. (2013). *Equipment Maintenance and Replacement Decision Making Processes*. San Luis Obispo, California: Faculty of California Polytecjnic state University.

Galvan M., P., Asato E., J., Godoy Z., J., Ortega, C., & Ramirez Farias, T. (12 de 2017). La Nube al servicio de las Pymes en dirección a la Industria 4.0. Pistas Educativas, 85-98.

García, M., Irisarri, E., Pérez, F., Estévez, E., & Marcos, M. (2018). *Arquitectura de Automatización basada en Sistemas Ciberfísicos para la Fabricación Flexible en la Industria de Petróleo y Gas. Polipapers, Universidad Politecnica de Valencia*, Vol 15, No. 2.

Gonzalez Torres, A. (11 de 2017). *TechTarget: La Industria 4.0 avanza en América Latina.* https://searchdatacenter.techtarget.com/es/cronica/La-Industria-40-avanza-en-America-Latina

Guillén, A., Crespo, A., Macchi, M., & Gomez, J. (2018). *Prognostics and Health Management in Advanced Maintenance Systems.* en A. Crespo, V. Gonzalez, & J. Gomez, *Advanced Maintenance Modelling for Asset Managment* (págs. 79-106). London: Springer.

Guzman, F. (29 de 03 de 2018). *PULSO: Industria 4.0 y los nuevos desafíos para Chile*. Santiago, Chile. http://www.pulso.cl/opinion/industria-4-0-los-nuevos-desafios-chile/

He , K., & Jin, M. (2016). *Cyber-Physical System for maintenance in industry 4.0.* Småland, Sweden: Jonkoping University.School of Enginiering.

Iglesias Fraga, A. (14 de 01 de 2018). *Ticbeat: Industria 4.0: del mantenimiento preventivo a la fabricación personalizada*. http://www.ticbeat.com/innovacion/industria-4-0-del-mantenimiento-preventivo-a-la-fabricacion-personalizada/

Ishikawa, K. (2013). *Diagrama de Ishikawa.* . Instituto para el Aseguramiento de la Calidad.

Joyanes Aguilar, L. G. (25 de Julio de 2011). *Computacion en la Nube e Innovaciones Tecnológicas.* Salamanca, España. https://goo.gl/gQzJzP

Jueguen, F. (23 de 02 de 2018). La Nación: Industria 4.0: presenta el Gobierno un plan para modernizar la economía. *La Nación: Industria 4.0: presenta el Gobierno un plan para modernizar la economía*.

Lee, J., & Bagheri, B. (2015). Cyber-Physical Systems in Future Maintenance. *Research Gates* (Pp. 299-305).

Pierano, F. (3 de 07 de 2018). El Economistadiario: Argentina frente a la era de la Industria 4.0. Buenos Aires, Argentina.

Ponce Talancon, H. (2007). *La matriz foda: alternativa de diagnóstico y determinación de estrategias de intervención en diversas organizaciones.* Enseñanza e investigación en psicología,.

PREDITEC: La estrategia predictiva en el mantenimiento industrial. (2017). www.preditec.com/.../la-estrategia-predictiva-en-el-mantenimiento-industrial-2017

Pruisán, M., & Valdés, F. (2017). La Industria Conectada 4.0. *La Econocimia Digital en España*, 89-100 No. 898.

Renancio, G. (29 de 08 de 2017). *La Innovación Necesaria: Mantenimiento Predictivo: comprender los datoas y predecir las fallas*. https://www.lainnovacionnecesaria.com/mantenimiento-predictivo-comprender-los-datos-y-predecir-fallos/

Roy, M. (09 de 2018). *TechTarget: Transformar la infraestructura y las operaciones de TI para impulsar el negocio digital.* https://searchdatacenter.techtarget.com/es/cronica/Transformar-la-infraestructura-y-las-operaciones-de-TI-para-impulsar-el-negocio-digital

Sanchez, A. (28 de 06 de 2016). *PROCON Ingenieros: Internet de las Cosas, Industria 4.0 y Mantenimiento Industrial*. Granada, España.

SIEMENS Mesoamérica. (11 de 2016). *¿Cómo afecta la Cuarta Revolución Industrial a la industria alimentaria.* Ciudad de México, México.

Siemens. The Magazine. (2017). Introducing SMEs to “Industrie 4.0”. Alemania.

Toda, I. (27 de 04 de 2017). *La Innovación Necesaria: Madurez de las organizaciones de mantenimiento de acuerdo al grado de complejidad del manejo/análisis de data*. https://www.lainnovacionnecesaria.com/el-nivel-de-madurez-de-las-organizaciones-en-el-analisis-de-datos/

Valente, J. (10 de 02 de 2018). CNI quer políticas públicas de apoio à implantação de modelos de indústria 4.0. *Agencia Brasil: CNI quer políticas públicas de apoio à implantação de modelos de industria 4.0.*

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

USO DE LA METODOLOGÍA FMECA - RCM, PARA LA OPTIMIZACION DE LA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO EN UNA PLANTA DE TOSTACION DE COBRE

USING FMECA - RCM METHODOLOGY AS A TOOL FOR THE OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE STRATEGY IN A COPPER ROASTING PLANT

Edgar Estupiñan[*], Oscar Cordero[*]

[*] **Universidad de Tarapacá,** Escuela Universitaria de Ingeniería Mecánica.
Av. 18 de Septiembre 2222, Arica, Chile.
Tel: +56582205282
E-mail: eestupin@uta.cl

Resumen: Los cambios y variaciones cada vez más frecuentes en los precios del cobre, dejan de manifiesto, la necesidad de que las empresas mineras sean cada vez más rigurosas en el control de costos de producción, manteniendo su competitividad en el mercado internacional. De esta manera, el uso e implementación de nuevas estrategias de mantenimiento están teniendo una mayor acogida, dado que pueden permitir contener y bajar los costos asociados a la producción. En este trabajo, se presenta el caso de una empresa minera de Chile, la cual se ha propuesto reducir significativamente sus costos de producción, lo que implica necesariamente dirigir esfuerzos en aquellos procesos que regularmente presentan baja disponibilidad y altos costos de mantenimiento, como lo es en este caso, el proceso de tostación. Por lo tanto, mediante un análisis de sensibilidad, se demuestra la conveniencia de implementar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, utilizando la metodología FMECA, que con el apoyo de herramientas matemáticas y estadísticas, permite tener información relacionada con el estado de los equipos, así como también, permite identificar brechas y oportunidades de mejora de manera priorizada.

Palabras clave: Gestión de Mantenimiento, Confiabilidad, FMECA, Minería.

Abstract: The changes and variations in copper price, each time more often, has shown the challenge of being more rigorous in the control of production costs in the mining industry. Therefore, the use and implementation of new maintenance strategies should be adopted in order to control and lower the costs associated to the production costs. The case of a mining company in Chile, which has priorized as a goal, to reduce production costs significantly, is presented in this work. Thus, the main efforts were concentrated on those processes with lower availability and higher maintenance costs, such as, it is the case of the roasting process. Therefore, by means of a sensitivity analysis, it is showed the convenience of implementing a reliability centered maintenance plan, by using the FMECA methodology, with the support of mathematical and statistic tools, that allow to get information about the condition of machines, as well as, to identify gaps and opportunities for improvement.

Keywords: Maintenance management, Reliability, FMECA, Mining.

1. INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones de precios de los minerales son cada vez más frecuentes, dados los constantes cambios en los contextos geopolíticos y económicos a nivel global, como también de los factores climáticos, entre otros aspectos, que van más allá del ámbito industrial. De esta manera, las compañías mineras requieren mantener en niveles óptimos los costos de producción, y por tanto deben consecuentemente disminuir los gastos asociados a mantenimiento. El presente estudio se centra en una planta de tostación de cobre de una importante compañía minera de cobre en Chile, en donde sus directivos se han propuesto alcanzar un nivel de disponibilidad para los equipos de la planta del 95%, como también, disminuir los costos asociados al mantenimiento, los cuales superan actualmente a lo planificado. El equipo de mayor criticidad que debido a sus detenciones imprevistas, afecta la disponibilidad de la planta de Tostación, corresponde al horno de tostación. Por lo tanto, mediante un estudio de sensibilidad utilizando la metodología FMECA-RCM[1], se busca proponer mejoras que permitan optimizar el plan de gestión de mantenimiento, y consecuentemente mejorar los indicadores de confiabilidad y disponibilidad de los equipos críticos de la planta de tostación.

2. METODOLOGIA

La metodología FMECA (Luthra, 1991) permite analizar la funcionalidad de los equipos a partir de sus modos de falla, estableciendo su jerarquía, lo que contribuye a poder elaborar planes de mantenimiento focalizados en aquellas fallas de mayor criticidad de los equipos. La implementación del FMECA consta de cinco etapas principales:

***Contexto del equipo*.** Se deben identificar los modos de operación de los equipos analizados, como también las necesidades desde el punto de vista del usuario/operario. También se deben identificar todos los parámetros operacionales.

Análisis Funcional. Se deben identificar las fallas que provocan pérdida de función o funciones de los equipos analizados.

Identificación de los modos de fallas. Se identifica la forma en que el equipo pierde su función, cada modo de falla corresponderá a una tarea de mantenimiento.

Efectos y consecuencias de una falla. En esta etapa se considera como falla se manifiestan las fallas y sus consecuencias (de producción, personales o ambientales).

Jerarquización del Riesgo. La jerarquización permite optimizar las acciones y recursos de mantenimiento (ISO, 2011). El Número Probabilístico de Riesgo; NPR = D.O.S; dónde; D: Detectabilidad; O: Ocurrencia; S: Severidad.

Una vez realizada la priorización, se aplica la metodología RCM, especialmente a aquellos modos de falla de mayor ponderación (Moubray, 2001).

Para la estimación de las tasas de fallas y el nivel de confiabilidad, se utiliza la distribución de Weibull (Quintana, et al., 2015), cuya función general está definida por la ecuación 1.

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\times\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^{\beta-1}\times e^{-((t-\gamma)/\eta)^{\beta}} \quad (1)$$

Dónde:

$f(t)\geq 0, \quad t\geq\gamma,\ \beta>0,\ \eta>0, \quad -\infty<\gamma<\infty,$ η = parámetro de escala; β = parámetro de forma;
γ = parámetro de ubicación.

De la función de distribución acumulada de fallas se obtiene:

- Función de Confiabilidad.
  $R(t)=1-f(t)$ (2)

- Distribución de Falla
  $$\lambda(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

[1] FMECA: Failure Mode Effect Cause Analysis; RCM: Reliability Centered Maintenance

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Las detenciones del complejo, son registradas por el sistema de eventos planta. Para el presente estudio se utilizan datos registrados en el sistema, durante el periodo comprendido entre julio 2015 y julio 2016, relacionados con las detenciones imprevistas asignadas a mantenimiento mecánico, de los equipos críticos, que corresponden a aquellos equipos que por causa de un fallo inesperado, detienen el proceso de tostación.

3.1 Determinación de equipos críticos

El complejo de Tostación, es la planta con la disponibilidad más baja dentro de la Compañía minera, correspondiendo a un 85%. Al elaborar un diagrama de Pareto para determinar los equipos que más impactan en las detenciones del complejo de tostación, se identifican los equipos más críticos; seis de los cuales concentran el 95 % de las detenciones del complejo de Tostación, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Equipos de mayor criticidad

Equipo	Horas de detención	% Acumulado
Enfriador 1	239,451	55,0%
Rastra 3	81,71	73,8%
Tornillo 14	41,26	83,3%
Enfriador 2	29,448	90,0%
Transporte Neumático	13,55	93,1%
Tornillo 13	8,4	95,1%

3.2. Análisis de confiabilidad de equipos críticos

Para determinar el nivel de confiabilidad de los equipos principales se utiliza la distribución de Weibull de 2 parámetros (Waghmode y Sahasrabudhe, 2012), siendo este, el modelo de distribución de probabilidad que mejor se adapta a equipos electromecánicos. En la tabla 2, se muestra el resumen de los resultados obtenidos a partir de las curvas de densidad de falla y probabilidad obtenidas para cada uno de los equipos críticos (Cordero y Estupiñan, 2018).

Tabla 2: Parámetros de Confiabilidad, equipos críticos planta de tostación.

Equipo	MTTR (hrs.)	MTBF (hrs.)	β	η (hrs.)	B50
Enfriador 1	6.8	250.2	0.67	189.9	110.1
Rastra 3	3.1	574.1	0.54	323.5	163.2
Tornillo 14	5.9	461.1	1.96	520	431.3
Enfriador 2	4.2	255.7	1.77	287.3	233.6
Transporte Neumático	2.3	674.2	6.5	723.3	683.9
Tornillo 13	1.7	237.4	1.46	262	203.7

MTTR: *Mean time to repair*; **MTBF**: *Mean time between failure*.

De los resultados obtenidos se puede destacar lo siguiente:

- Para el enfriador 1 y la rastra 3, la densidad de fallas tiene una forma decreciente, dado el factor $\beta < 1$ ($\beta = 0,67$; $\beta=0,54$). Por tanto, se puede deducir que ambos equipos están en una etapa de fallas prematuras.

- Para el tornillo 14, enfriador 2, transporte neumático y tornillo 13, el factor $\beta > 1$, indica que las tasas de falla son crecientes. Por tanto, se puede deducir que estos equipos están en una etapa de fallas por vejez.

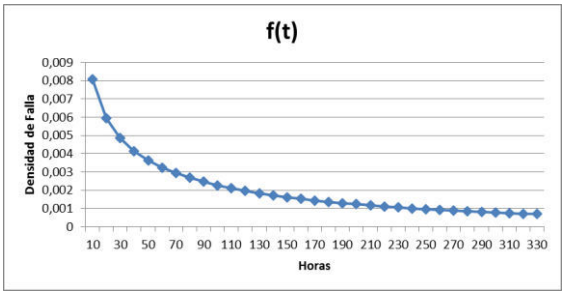
- El enfriador 1 es el equipo con mayor número de horas de detención, por tanto con menor disponibilidad y mayor criticidad. El tiempo medio entre fallas es de 250,2 horas, con un 30% de probabilidad. El factor $\eta = 189,9$, implica que sobre este número de horas se concentra el 63,2% de las fallas. La probabilidad de falla de un 50% está en las 110 horas, esto se denota por el valor de B50. Las curvas de densidad de falla y probabilidad para el enfriador 1, se muestran en la tabla 3.

3.3 Análisis de funcionalidad e identificación de los modos de falla

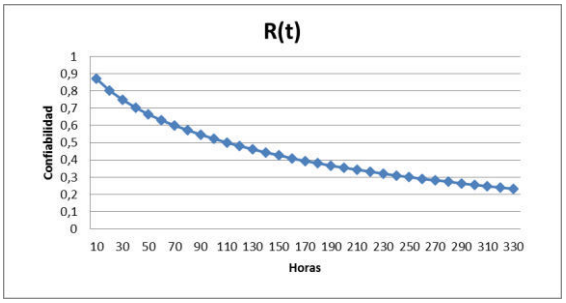
Desde el punto de vista de la función que cumplen cada uno los seis equipos principales, son solamente cuatro tipos de equipos distintos: enfriadores (1 y 2); tornillos de transporte (13 y 14); la rastra y el transportador neumático.

Tabla 3: Enfriador 1- Densidad de falla, confiabilidad y parámetros de Weibull.

Densidad de Falla



Confiabilidad



Parámetros Weibull

$\beta = 0,67$

$\eta = 189,9$

$\gamma = 0,00$

Vida media = 250,2

B50 = 110,1

Enfriadores de Calcina.
Son los equipos encargados de bajar la temperatura de la calcina, desde 550°C en la entrada, hasta 80°C en la salida. Esto ocurre a una tasa de 40 ton/hr., con una velocidad de rotación de 4 RPM. Al realizar el análisis de modos de falla, se encuentran los fallos funcionales principales: enfriador no gira; enfriador no enfría; alta temperatura de salida agua de enfriamiento (mayor a 60 °C); pérdida de agua de refrigeración; fuga de calcina hacia el exterior.

Rastra 3.
Equipo encargado de transportar de manera continua calcina a 80°C desde la rastra 9 y rastra 10 hacia el chute de descarga y el harnero vibratorio, a razón de 100 Ton/hr, Los fallos funcionales principales son: rastra no transporta calcina; fuga de calcina hacia el exterior.

Tornillos.
Cumplen la función principal de transportar de manera continua calcina a 500°C desde el ciclón primario hacia el chute de descarga y hacia el enfriador, a razón de 50 Ton/hr. Su función debe ser cumplida, sin que haya pérdida de calcina, sin pérdida de agua de refrigeración, y sin humedad en calcina. Los componentes críticos de mayor tasa de falla son packing de estopa, cadena motriz y descanso motriz, los cuales son reemplazados en la mayoría de los casos, cuando presentan falla. Las principales fallas funcionales detectadas para el tornillo de transporte son: tornillo no transporta calcina; pérdida de agua de refrigeración; fuga de calcina hacia el exterior.

Transporte Neumático.
Transporta de manera continua calcina a 80°C desde la rastra 3 hacia las tolvas de despacho de calcina, a razón de 100 Ton/hr. Su principal falla funcional es que no haya transporte de calcina.

3.4 FMECA-RCM aplicado a los enfriadores

Para el análisis que se describe a continuación, se considera como modelo el caso del enfriador de calcina No.1, dada su alta criticidad por el elevado número de horas de detención que ha presentado comparado con los demás equipos principales. Esto, a pesar de que el análisis se realiza de manera completa para todos los equipos principales de la planta de tostación (Cordero y Estupiñan, 2018).

La estrategia de mantenimiento para los enfriadores está basada en la inspección de componentes críticos. Usualmente las inspecciones consideran rutinas de medición de vibraciones (elementos rodantes, rodillos y motor eléctrico); y rutas de lubricación (rodillos, motor, reductor y cadena de transmisión). Complementariamente, se llevan a cabo inspecciones visuales, monitoreo de comportamiento de corriente eléctrica y nivel del estanque de agua desmineralizada. Generalmente, cuando existen componentes críticos con algún tipo de fallo que impide la operación óptima del enfriador, se realiza una detención no programada, con el fin de dar solución a la falla y seguir operando. Según los datos históricos tomados para

el estudio, los componentes con mayor tasa de falla son los "cassettes". En los últimos 12 meses, se han cambiado 24 cassettes en mantenciones programadas y 18 cassettes en mantenciones no programadas. Además, debido a fallos inesperados, se han debido cambiar otros componentes principales tales como los sellos.

Realizando el análisis mediante la metodología FMECA, la cual permite reconocer la naturaleza de las fallas, las necesidades del mantenimiento y las áreas de mejora potenciales; y complementando el análisis mediante el árbol de decisión (metodología RCM), se puede obtener una lista completa priorizada de las actividades de mantenimiento y de los repuestos críticos (Cordero y Estupiñan, 2018). Como resultado de este análisis, se puede ver la propuesta de optimización del plan de mantenimiento para los modos de falla críticos del enfriador, en el anexo 1.

4. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

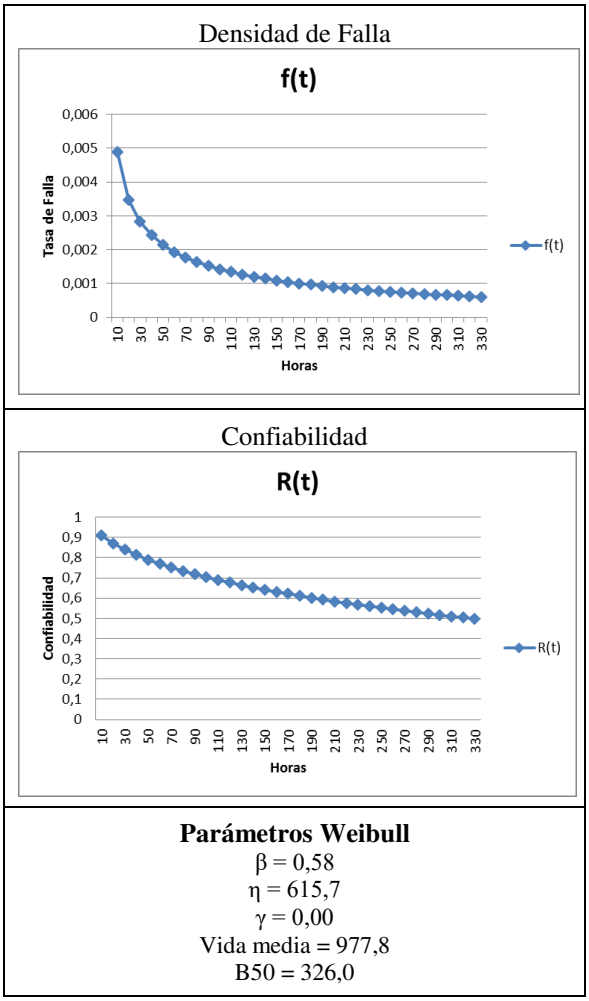
Se realizó un análisis de sensibilidad, con el fin de estimar el incremento de la confiabilidad y la reducción de los costos por pérdidas de producción y gastos de mantenimiento, con la propuesta de plan de mantenimiento optimizada para el enfriador de calcina 1. Para ello, se considera una producción de calcina de la planta de 69 Ton/hr., con un costo aproximado de 1200 USD/Ton. Además, respecto de los gastos de mantenimiento, sólo se consideran aquellos debidos a sobre-consumo de repuestos, ya que no hay sobre costo por personal dado los turnos fijos día y noche con que ya se cuenta en la planta.

Por lo tanto, el gasto causado por pérdidas de producción según el plan actual (considerando: 240 horas detención, a 1200 US/Ton, 69 Ton/hr.), asciende a la suma de MU$19830, adicional a un sobreconsumo de repuestos por la suma MU$265; obteniendo un total de pérdidas por MU$ 20095 dólares.

Por otra parte, si se utiliza el plan de mantenimiento optimizado, el recambio de componentes debiese disminuir la ocurrencia de fallas imprevistas. Si se estima que el número de detenciones imprevistas, que generan pérdidas de producción, disminuye de 35 a 13 eventos, con un total de 36.3 horas de detención; el gasto asociado a pérdidas por producción sumado al gasto por sobreconsumo de repuestos (aprox. U$1000, por concepto de cambio de sellos de entrada y salida); asciende a la suma de MU$3006.

Los parámetros de confiabilidad, tomando en cuenta la nueva propuesta de plan de mantenimiento, para el enfriador 1, y considerando la disminución del número de detenciones imprevistas; se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Curvas de densidad de falla y confiabilidad, para el Enfriador 1 (con plan propuesto).



Como se puede observar de los gráficos y resultados mostrados en la tabla 4, comprándolos con la tabla 3, se aprecia una mejora en los valores de vida media y tiempo en probabilidad de falla al 50% que suben de 250 a 977,8 horas para el caso de vida media, y de 110 a 326 horas en el caso del B50. También se aprecia mejora en el valor de η, parámetro que concentra el 62,3% de la fallas, y que cambia de 189 a un nuevo valor de 615 horas. En resumen se puede apreciar que con el plan propuesto, la confiabilidad del equipo aumenta, como también, hay una significativa disminución de las pérdidas o gastos relacionados con mantenimiento, por un monto aproximado de MU$17089.

Sí se aplica la metodología para los demás equipos principales de la planta de tostación, y se comparan las pérdidas actuales con las proyectadas considerando los planes de mantenimiento optimizados, se obtiene una reducción de gastos por mantenimiento principalmente, debido a imprevistos y sobreconsumo de repuestos, por un monto cercano a los MU$30000; y logrando un gasto optimizado por concepto de mantenimiento, por un monto de MU$4895, considerando todos los equipos principales de la planta de tostación. Respecto de la disponibilidad, se obtiene una mejora importante, pasando del 83,25%, al 87,28%, con el plan propuesto.

5. CONCLUSIÓNES

Debido a la naturaleza de la operación de la planta de tostación, se ha podido constatar que la metodología FMECA – RCM, permite evaluar los equipos principales, de tal manera de poder contar con una propuesta optimizada de plan de mantenimiento, para cada uno de los equipos críticos de la planta. De esta manera, se busca disminuir las detenciones imprevistas, las cuales producen daño progresivo a la integridad del lecho del horno de tostación.

Un enfoque de mantenimiento basado en confiabilidad, permite además acortar el tiempo de las detenciones, y disminuir las pérdidas asociadas a las mismas. Se pudo constatar mediante el estudio, que las pérdidas asociadas a costos de producción y sobreconsumo de repuestos por fallas imprevistas de equipos son muy cuantiosas alcanzando el valor cercano a los MU$35000. Lo anterior, considerando solamente seis equipos, que abarcan el 95% de las detenciones imprevistas durante un año de estudio, en el Complejo de Tostación de la División Ministro Hales de Codelco.

Luego de realizar el análisis de sensibilidad y utilizando la metodología y planes propuestos se estima alcanzar una reducción de costos de MU$30000, que están asociados principalmente a pérdidas de producción y sobre-consumo de repuestos.

REFERENCIAS

Luthra, P. (1991). *FMECA: an integrated approach*. Annual Reliability and Maintainability Symposium. Proceedings, Orlando, FL, pp. 235-241.

Moubray, j. (2001). *RCM Reliability Centred Maintenance*, Industrial Press Inc.

Quintana, A.E., Pisani, M.V., Casal, R.N. (2015). *Desempeño de cartas de control estadístico con limites bilaterales de probabilidad para monitorear procesos Weibull en mantenimiento*. Ingeniería, Investigación y Tecnología, January-March, Vol.16 (1), pp.143-156.

International Standard Organization. (2011). *ISO 17359: Condition monitoring and diagnostics of machines -- General guidelines*.

Waghmode, L.Y. and Sahasrabudhe, A.D. (2012). *Modelling maintenance and repair costs using stochastic point processes for life cycle costing of repairable systems*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. Apr/May, Vol. 25, Issue 4/5, pp. 353-367.

Cordero, O. and Estupiñan, E. (2018). *Propuesta de optimización del mantenimiento de planta minera de cobre Ministro Hales, mediante análisis de confiabilidad, utilizando la metodología FMECA*. Revista Investigación y Desarrollo, Vol. 18 (1), pp. 129-142.

ANEXO 1.
Plan de mantenimiento para los modos de falla críticos de los enfriadores

MODO DE FALLA / ESTRATEGIA	Sustitución Preventiva	Reacondicionamiento Ciclíco Preventivo	Inspeccion MONCON	Reparación a la condición	Reparación a la falla	Repuesto Critico	Cantidad
CORTE CADENA TRANSMISIÓN	1 vez al año	No aplica	1 vez por semana	Si existen saltos de cadena	No aplica	Cadena transmisión	1
FALLA MACHON ACOPLE	1 vez al año	No aplica	1 vez por semana	Si hay aumento en vibración de sistema	No aplica	Machon de Acoplamiento	1
FALLA REDUCTOR	1 vez cada 2 años	No aplica	1 vez por semana	Si hay aumento en vibración de sistema	No aplica	Reductor	1
FALLA EN MOTOR ELÉCTRICO	1 vez al año	No aplica	1 vez por semana	Si hay aumento en vibración de sistema/Temperatura/Corriente	No aplica	Motor Eléctrico	1
FALLA SPROCKET MOTRIZ O TENSOR	1 vez cada 2 años cambiar sprocket motriz	Sprocket tensor repara 1 vez al año buje	1 vez por semana	Si existe soltura en ajuste	No aplica	Sprocket Motriz/Tensor	1
RODILLOS TRANCADOS	1 vez cada 2 años	No aplica	1 vez por semana	Si existe soltura/Temperatura/vibración/Desgaste	No aplica	Rodillos Soporte y Axiales	4
CASSETTE OBSTRUIDO	No Aplica	No aplica	Todos los dias	Si existe alta temperatura en cabezal de cassette y salida de agua	No aplica	Cassette	_
BAJO CAUDAL AGUA REFRIGERACIÓN POR ROTURA INTERNA	1 vez al año	No aplica	Todos los dias	Si existe Fuga de Agua	No aplica	Flexibles de entrada/salida /manto	72
BAJO CAUDAL AGUA REFRIGERACIÓN POR BAJA EFICIENCIA BOMBAS	1 vez al año	No aplica	1 vez por semana	Si hay aumento en vibración de sistema/Baja eficiencia	No aplica	Bombas de agua desmineralizada	1
OBSTRUCCIÓN INTERCAMBIADOR DE	No aplica	Cada 6 meses	1 vez por semana	Por baja Eficiencia	No aplica	Placas Intercambiador	1
ROTURA INTERNA DE CASSETTE	Cada 4 Meses	No aplica	Todos los dias	Perdida brusca de agua desmineralziada/ Humedad en la calcina	No aplica	Cassette	18
ROTURA INTERNA PIPING DE AGUA REFRIGERACIÓN	1 vez al año	No aplica	Todos los dias	Perdida brusca de agua desmineralziada/ Humedad en la calcina	No aplica	Manifold Agua	1
ROTURA SELLOS ENTRADA/SALIDA	cada 15 dias	No aplica	Todos los dias	Si hay Polución de calcina	No aplica	Sellos polvo entrada /salida	24
ROTURA SELLO TROMEL	1 vez al año	No aplica	Todos los dias	Si hay Polución de calcina	No aplica	Sello Grafito Tromel	1
ROTURA MANTO ENDRIADOR	No aplica	No aplica	Todos los dias	Si hay Polución de calcina	No aplica	No aplica	No aplica
CANDADOS SUELTOS CASSETTE	No aplica	cada 15 dias	Todos los dias	Si hay Polución de calcina	No aplica	Candados	108

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD EN MOTOCOMPRESORES

MAINTAINANCE FOCUSED ON RELIABILITY IN MOTOR-COMPRESSORS

MIC Abraham Montalvo Rojas[*], Dra. Rosario Aldana Franco[**], Dr. Andrés López Velázquez [**], Dr. Ervin Jesús Álvarez Sánchez[**], Dr. Fernando Aldana Franco[**], Ing. Yazmín Rivera Peña[**].

[*] **Universidad Veracruzana,** Facultad de Ingeniería Química, Maestría en Ingeniería de la Calidad.
Lomas del Estadio S/N, Xalapa, Veracruz, México.
Teléfono y Fax: 52 228 8421700 ext, 11033.
E-mail: *ingabmonro@gmail.com*
[**] **Universidad Veracruzana,** Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Cuerpo Académico Ingeniería Transdisciplinar.
Lomas del Estadio S/N, Xalapa, Veracruz, México.
Teléfono y Fax: 52 228 8421757.
E-mail: *raldana@uv.mx* , *andlopez@uv.mx, eralvarez@uv.m , faldana@uv.mx*, yrivera@uv.mx

Resumen: Los motocompresores elevan la presión del gas después de una caída de presión y temperatura generada durante el acondicionamiento. El paro no programado eleva los costos, pues se deja de dar servicio y percibir ingresos. Para este estudio se analizaron 11 equipos, instalados en 3 plantas de bombeo, se usaron dos criterios: las fallas frecuentes y las fallas críticas, para determinar qué tipo de fallas tienen mayor impacto en la operación de los motocompresores; bajo el criterio de las fallas que generan más tiempo fuera de servicio, las fallas críticas resultaron más relevantes para mejorar la calidad del proceso. Tres fallas críticas representaron el 51.3% del tiempo de mantenimiento correctivo, al prevenirlas mediante un plan de mantenimiento basado en confiabilidad, se redujo el tiempo medio entre fallas (MTF) y el servicio de bombeo se interrumpió por menos tiempo.

Palabras clave: Fallas, motocompresores, mantenimiento.

Abstract: The motor compressors raise the gas pressure after a fall in pressure and temperature generated during conditioning. The unscheduled stoppage raises costs, as it stops providing service and receiving income. For this study, 11 teams were analyzed, installed in 3 pumping plants, two criteria were used: frequent faults and critical faults, to determine which type of faults have the greatest impact on the operation of the motor compressors; Under the criterion of failures that generate more time out of service, critical failures were more relevant to improve the quality of the process. Three critical faults represented 51.3% of the corrective maintenance time, by preventing them through a maintenance plan based on reliability, the mean time between failures (MTF) was reduced and the pumping service was interrupted for less time.

Keywords: Faults, motor compressors, maintenance.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio se realizó en 3 campos de una empresa que ofrece servicios de compresión de gas natural, donde operan 11 motocompresores reciprocantes, que al fallar hacen que el Tiempo Medio entre Fallas (por sus siglas en inglés MTBF) se reduzca; durante el año 2015, fue un 627.88 horas, superior a la meta establecida para ese año de 560 horas, mientras que en 2016 el MTBF fue 632.05 horas, inferior a la meta para ese año de 720 horas, lo que implicó incumplir la meta de operación.

El tiempo medio entre fallas puede incrementarse mediante la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad, de conformidad con la norma ISO 14224.

2. MARCO TEÓRICO

El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) es el que transcurre entre la puesta en operación de un equipo y el momento en que falla, si es pequeño, los paros no programados son frecuentes y al realizar un estudio de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (por sus siglas RCM) se puede estimar la vida útil de los componentes de un equipo y, por lo tanto, controlar la frecuencia de fallas para elevar el MTBF.

1.1 Antecedentes

Se han estudiado las fallas de motocompresores; por ejemplo, Corvaro et al (2016) usó un análisis Confiabilidad-Disponibilidad-Mantenibilidad (por sus siglas en inglés RAM) para definir los periodos de ejecución del mantenimiento, priorizó el mantenimiento preventivo, para tener una disponibilidad mayor al 96%. En otra investigación Voiniov et al (2016) rediseñó las válvulas de pétalo de compresor, para incrementar su vida útil, incrementando el MTBF hasta en un 50%. En tanto, Townsend et al (2016), estudiaron la temperatura en los cojinetes de 14 motocompresores, cambiaron un sistema instrumentado de protección mecánico de temperatura por uno electrónico e inalámbrico, la confiabilidad del sistema mecánico fue 2.04% mientras que para el sistema electrónico fue 99.99%, que incrementó el MTBF de todo el equipo. Melo González et al (2009) estimó la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad, mediante una simulación tipo Monte Carlo, de un sistema de compresión de gas amargo durante, observó que la confiabilidad del sistema de compresión decrece a través del tiempo, determinó la variación de la tasa de fallas, la función de densidad de probabilidad de fallas, así como el tiempo promedio del mantenimiento de las fallas, mientras que la disponibilidad obtenida fue 99.95%, antes de la puesta en operación de los equipos.

1.2 Mantenimiento

Mantenimiento es el conjunto de actividades interrelacionadas, técnicas, administrativas y de supervisión, que tienen como finalidad mantener o reparar un equipo para que este opere o se encuentre en un estado que le permita realizar las funciones (International Organization For Standarization, 2016); en las normas ISO 14224 e ISO 22400 se reconoce dos tipos de mantenimiento, preventivo y correctivo.

El mantenimiento preventivo se lleva a cabo en un periodo programado y se consideran actividades determinadas, para disminuir la probabilidad de avería o el deterioro del equipo (International Organization For Standarization, 2016), se lleva a cabo en una suspensión prevista del proceso, para no afectar la producción, contando con presupuesto para este tipo de mantenimiento (Clará Díaz, Domínguez de la Paz y Pérez Medrano, 2013).

El mantenimiento correctivo se realiza posterior a la ocurrencia de la falla, para que pueda seguir con su operación normal requerida (International Organization For Standarization, 2016), se producen paros en el proceso productivo, reduciendo el tiempo operativo efectivo, también genera gastos por reparaciones no previstas, lo que con el paso del tiempo puede dar lugar a falta de recursos económicos para adquirir los repuestos necesarios o costear el mantenimiento de los equipos (Moubray, 2004).

1.3 Confiabilidad

Confiabilidad es la probabilidad de que un componente o sistema desempeñe, de manera satisfactoria, la función para la que fue creado,

durante un periodo establecido y bajo condiciones de operación específicos (Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar, 2009).

2. METODOLOGÍA

Se organizó en tres fases, la primera fue el análisis de las fallas de los Motocompresores, conformada por 4 actividades (revisión del historial de fallas y horas de operación en la empresa, establecer el catálogo de fallas, creación de la base de datos de fallas y análisis causa-efecto de fallas) y permitió identificar la falla crítica de cada planta, así como la frecuencia con la que suceden; en la segunda fase se estableció el programa de mantenimiento para cada planta, al conocer la falla crítica y su frecuencia es posible anticiparse a la falla mediante el mantenimiento centrado en confiabilidad; y en la tercera fase, se aplicó el plan de mantenimiento centrado en confiabilidad a las fallas que más impactan al proceso.

El tiempo medio entre fallas (MTBF) mes el promedio del tiempo que existe desde que un equipo empieza a operar hasta el momento t, en el que ocurre la falla (ver ecuación 1)

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TBF_i}{FE+1} \qquad (1)$$

Donde $TBFi$ (Tiempo de Operación Entre Fallas) es el total de tiempo operado entre dos eventos de falla consecutivos de un equipo reparado **y** FE (Evento de Falla) es el final de la capacidad de un equipo para realizar una función requerida.

El tiempo medio para reparar (MTTR) es el tiempo promedio necesario para restaurar un componente que ha fallado en una unidad de trabajo (International Organization for Standardization, 2014a). Se expresa en horas y se calcula para cada unidad de trabajo, con la ecuación 2.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TTR_i}{FE+1} \qquad (2)$$

Donde $TTRi$ (Tiempo de Reparación) es el intervalo de tiempo durante el cual un equipo está fuera de operación debido a una falla **y** FE (Evento de Falla) es la terminación de la capacidad de un equipo para realizar una función requerida.

La disponibilidad ($DISP$) es la capacidad de una unidad de trabajo para operar y se calcula en relación con la capacidad disponible (International Organization for Standardization, 2014b), se expresa en porcentaje y es llamado factor de capacidad, se calcula con la ecuación 3.

$$DISP = \frac{TO}{TPO} \qquad (3)$$

Donde TO (Tiempo Operación) **es el t**otal de tiempo operado dentro del periodo que se requiere analizar **y** TPO (Tiempo Planeado de Operación) **e**s el tiempo de operación, menos el tiempo de inactividad planificado.

3. RESULTADOS

Los resultados se reportan en el mismo orden que la metodología, iniciando con el análisis de fallas.

3.1 Análisis de fallas

El análisis de las fallas en Motocompresores permitió identificar la falla crítica y el MTBF crítico en cada una de las tres plantas para diseñar el programa de mantenimiento para cada planta. Con base en el historial de fallas se determinó que, en promedio, ocurrió una falla cada 632.05 horas, que se tardó 5.95 horas, en promedio, en reparar cada falla, para tener una disponibilidad del 99.53% para el año 2016; esta confiabilidad fue superior al 96% (Corvaro et al, 2016) en su estudio de simulación de la aplicación de análisis confiabilidad-disponibilidad-matenibilidad, a la operación de Motocompresores y similar a la simulación con Monte Carlo (Melo González et al, 2009) con 99.95%.

También se analizó la frecuencia anual de las fallas por cada estación de bombeo (ver tabla 1); en las estaciones A y C la falla más frecuente es “Sistema de control o tablero” (6 y 3 fallas, respectivamente), y en la estación B, el “Sistema motriz” (20 fallas).

Tabla 1. Frecuencia de fallas

Sistema objeto de la falla	Estación A	Estación B	Estación C
Sistema motriz	5	20	2
Sistema impulsado compresor	1		
Sistema de control o Tablero	6	3	3
Sistema de lubricación forzada	4	2	1
Sistema de lubricación	1	2	
Sistema de Gas combustible		1	
Sistema de encendido		1	
Sistemas auxiliares	1	2	
Sistema de seguridad		1	
Sistema drene de líquidos	2		
Sistema de enfriamiento		7	1
Proceso	3		
Otro		3	

En cada una de las estaciones de bombeo se identificaron fallas críticas distintas, con base en la proporción del tiempo del mantenimiento correctivo dedicado a reparar (ver tabla 2). La falla crítica en la estación A, fue el "Proceso" (76.4%), en la estación B, el "Sistema impulsado compresor" (51.3%), y en la estación C, el "Sistema de control o tablero" (40.5%).

*Tabla **2. Proporción del tiempo de mantenimiento correctivo dedicado a reparar las** fallas*

Sistema objeto de la falla	Estación A	Estación B	Estación C
Sistema motriz	5.1%	30.6%	35.7%
Sistema impulsado compresor	2%	**51.3%**	
Sistema de control o Tablero	5.6%	1.8%	**40.5%**
Sistema de lubricación forzada	4.2%	0.5%	7.1%
Sistema de lubricación	0.7%	0.9%	
Sistemas auxiliares	2.2%	2.2%	
Sistema de enfriamiento	3.7%	9.1%	9.5%
Proceso	**76.4%**	1%	

Atender las fallas críticas incrementó el tiempo medio entre fallas, más que dedicarse a las fallas frecuentes. En la tabla 3 se muestra el tiempo medio entre fallas (MTBF) para la falla más crítica por cada estación de bombeo.

*Tabla **3. Tiempo medio entre fallas (MTBF) para la falla más crítica***

	Estación A	Estación B	Estación C
Horas operadas	4,433.3	8.493.8	5.030.8
Fallas críticas	2	2	1
MTBF de falla más crítica (horas)	2.216.7	4,246.9	5,030.8

3.2 Programa de mantenimiento

Se diseñó un plan de mantenimiento donde la frecuencia de mantenimiento se debe realizar al 80% del tiempo medio para reparar la falla crítica, así en la estación A se debe realizar el mantenimiento de "Proceso" cada 74 días (o 1773.33 horas), en la estación B, el mantenimiento al "Sistema impulsado compresor" se recomienda realizarse cada 142 días (o 3397.50 horas) y en la estación C, el mantenimiento preventivo al "Sistema de control", se recomienda llevarlo a cabo cada 168 días (o 4024.66 horas).

3.3 Aplicación del plan de mantenimiento

Al aplicar el plan de mantenimiento las horas operadas se incrementaron en 0.5%, las horas de mantenimiento correctivo disminuyeron 52.64%, la cantidad de fallas se decrementó 11.84% (ver tabla 4).

*Tabla **4. Comparación de indicadores atendiendo las fallas frecuentes VS fallas críticas***

Indicador	Con fallas frecuentes	Con fallas críticas	Mejora porcentual
Horas operadas	48,036	48,274.09	0.50%
Horas de mantenimiento correctivo	452.33	214.24	-52.54%
Horas disponibles	47,871.67	47,871.67	0%
Cantidad de fallas	76	67%	-11.84%

Los indicadores obtenidos a partir de la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad se resumen en la tabla 5. El tiempo medio entre fallas se incrementó 14% (720.51 horas), mientras el

tiempo medio para reparar disminuyó 46.22% y la disponibilidad aumentó 0.25%.

*Tabla 5. **Indicadores de calidad con la aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad***

		Sin mantenimiento centrado en confiabilidad	Con mantenimiento centrado en confiabilidad	Mejora porcentual
MTBF		632.05	720.51	14%
MTTR		5.95	3.20	-46.22
DISP		99.53%	99.78%	0.25

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos al aplicar el plan de mantenimiento se observó que el MTBF aumentó, el MTTR disminuyó (46.22%) y la DISP aumentó (14%), se aprecia que concuerdan por los obtenidos por Berger y colaboradores (2012) al determinar que el uso del mantenimiento preventivo incrementó la disponibilidad 99.33%, así como el incremento de la disponibilidad del 87% al 87.5% y reducción del tiempo medio para reparar MTTR de 5.3 hrs a 4 hrs (Flores et al, 2010).

4. CONCLUSIONES

Existe una relación estrecha entre la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad y los indicadores, se comprobó que los indicadores MTBF, MTTR Y DISPONIBILIDAD fueron modificados de manera positiva. El indicador de mayor importancia fue el MTBF, que aumentó; sin embargo, el MTTR disminuyó y la disponibilidad (DISP) también se incrementó; se concluyó que la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad mejora los indicadores MTBF, MTTR y DISP**.**

RECONOCIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCyT) por la beca de posgrado concedida al Ing. Abraham Montalvo para realizar estudios de Maestría en Ingeniería de la Calidad MIC) y a la Universidad Veracruzana por brindar el apoyo para la realización de este estudio, a través de la Coordinación de la MIC.

REFERENCIAS

Clará Díaz O, Domínguez de la Paz R y Pérez Medrano E. (2013). *Sistema de Gestión de mantenimiento productivo total para talleres automotrices del sector público*. Ciudad Universitaria, El Salvador.

Corvaro F., Giacchetta G, Marchetti B., Recanati M. (2016). *Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618*, Petroleum, doi:10.1016/j.petlm.2016.09.002.

Flores M, Torres J, Rodríguez J, Alcaraz A (2010). *Confiabilidad Operativa de Sistemas para Compresión de Gas y Generación Eléctrica en Complejos Petroleros*. Inf. Tecnol. V.21 n.3 La Serena 2010, pp 13-25. ISSN 0718-0764.

Gutiérrez-Pulido H y De la Vara Salazar R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. México, DF. McGraw-Hill/Interamericana Editores, SA de CV.

Melo-González R, Lara-Hernández C y Jacobo-Gordillo F. (2009). *Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación de Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería*. Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 24; núm. 2, julio-diciembre, 2009, pp. 93-104. ISSN 0186-6036. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C. Monterrey, México.

Moubray J. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad.* RCM II. USA: Lillington, ISBN-13: 978-0750633581.

Townsend J, Affan M, Szekerces J. (2016). *Updating temperature monitoring on reciprocating compressor connecting rods to improve reliability*. Engineering Science and Technology, an International Journal. Vol. 19, Issue 1, March 2016, pp 566-573.

Voiniov K, Grigor A, Grigor K. (2016). *Compressor Reliability Improvement* in Procedia Engineering, Vol. 150, pp 448-452.

SITIOS WEB

International Organization for Standardization (2016). ISO 14224:2016. Industrias del petróleo y gas natural – Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. https://www.iso.org/standard/64076.html (Consultado: 10 de diciembre de 2017).

International Organization for Standardization (2014a). ISO 22400-2:2014. Manufacturing operations management – Key performance indicators https://www.sis.se/api/document/preview/916920/ (Consultado: 1 de febrero de 2018).

International Organization for Standardization (2014b). ISO 55001:2014. Asset management – Management systems – Requirements https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55001:ed-1:v1:es (Consultado: 6 de febrero de 2018).

IX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (COLIM 2018)
Universidad de Pamplona – Colombia
Programa de Ingeniería Mecánica
28 – 30 de Noviembre de 2018

INCREMENTO DEL TAMAÑO DE LOS DATOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA

DATA SIZE INCREMENT FOR FAULT DETECTION ON ROTATING MACHINERY

MBA. Adriana Guamán Buestán[*], PhD. Diego Cabrera Mendieta[*], PhD. René V. Sanchez Loja[*], PhD Mariela Cerrada Lozada[*]
PhD. Juan Manuel Cevallos Ampuero [**]

[*] **Universidad Politécnica Salesiana**, Grupo GIDTEC.
Calle Vieja y Elia Liut, Cuenca, Azuay, Ecuador.
(593) -7862213
aguaman@ups.edu.ec, dcabrera@ups.edu.ec, rsanchezl@ups.edu.ec, mcerrada@ups.edu.ec
[**] **Universidad Nacional Mayor De San Marcos,** Facultad de Ingeniería Industrial, Doctorado en Ingeniería Industrial.
Ca. Germán Amézaga 375 Ciudad Universitaria - Lima 01, Perú
(511) 619 - 7000 anexo 1805 / 1819
juanmanuelcevallos@gmail.com

Resumen: En los últimos años se ha incrementado el uso de técnicas de modelamiento basado en datos para el diagnóstico de fallos en maquinaria rotativa. Estas técnicas requieren de grandes cantidades de datos que no siempre se pueden obtener pues generan altos costos y tiempo excesivo, que son difíciles de solventar desde el punto de vista económico y técnico. El presente trabajo se enfoca en el pre-procesamiento de las señales de vibración y propone un método para incrementar el número de series temporales informativas de una máquina rotativa sin el incremento del tiempo y costos en la etapa de adquisición de las señales. Como resultado se ha obtenido una ampliación de 315 señales en la fase de adquisición de datos a 429000 luego de la aplicación del método; cantidad adecuada para la construcción de modelos basados en datos, incluso de deep learning para la detección de fallos en maquinaria rotativa.

Palabras clave: Adquisición de datos, pre-procesamiento, rodamientos, señales

Abstract: In recent years, the use of data-based modeling techniques for the diagnosis of rotating machinery failures has increased. These techniques require large amounts of data that can't always be obtained because they generate high costs and excessive time, which are difficult to solve from the economic and technical point of view. The present work focuses on the pre-processing of vibration signals and proposes a method to increase the number of informative time series of a rotary machine without the increase of time and costs in the stage of acquisition of signals. As a result, an expansion of 315 signals was obtained in the data acquisition phase to 429000 after the application of the method; adequate amount for the construction of models based on data, including deep learning for the detection of failures in rotating machinery.

Keywords: Data acquisition, pre-processing, bearings, signals.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución del mantenimiento desde varias décadas, ha impulsado el desarrollo del mantenimiento predictivo (Ahmad y Kamaruddin, 2012). Al respecto se ha dado una gran cantidad de aportes que le han posicionado como un factor clave dentro de los procesos productivos y ser visto como una oportunidad de mejora por la reducción de costos por paradas no programadas, seguridad para el operario y mejora en la calidad de los productos (Jardine, Lin, y Banjevic, 2006). Los esfuerzos en el ámbito investigativo para la detección de fallos, como los realizados por Yin, Ding, Xie, Luo, (2014), Goyal y Pabla, (2016) y Cabrera, Sancho, Cerrada, Sánchez, y Tobar, (2018) han dado como resultado el avance de diversas estrategias para el monitoreo de la condición, con el uso de datos de parámetros como la vibración, emisión acústica, entre otras.

Para estas estrategias es necesario contar con las señales que definan la condición de la máquina. Su adquisición supone ser la etapa que mayor tiempo y recursos consume, pues las señales adquiridas deben ser lo más realistas posibles en condiciones específicas establecidas y que contengan las características deseadas para el modelamiento (Virtanen, Plumbley, y Ellis, 2017). En muchos casos esto resulta poco viable por los altos costos y tiempo necesario. El motivo que lo genera es la diversidad de fallos que se pueden originar, considerando que se presentan de forma individual o secuencial.

El proceso de adquisición de señales involucra la recopilación y almacenamiento de información proveniente de elementos específicos que son de interés del investigador como la elección del tipo de sensor, su ubicación, cantidad, el hadware de adquisición y almacenamiento, así como el procedimiento para su adquisición (Fugate, Sohn, y Farrar, 2001). Al necesitar una cantidad robusta de señales este procedimiento se vuelve largo y costoso pudiendo ser en muchos casos inviable.

También es importante puntualizar que para el modelamiento basado en datos es necesario realizar la clasificación de las características que identifican el estado de la máquina. Para el efecto, existen métodos que se ejecutan de forma manual y automática (Kumar, Shankar, y Thakur, 2017). Para los métodos basados en aprendizaje automático, se requiere una cantidad suficiente de datos que proporcionen diversidad de las diferentes condiciones de la máquina y que permitan que el modelo tenga capacidad de generalización.

Por lo anterior, este documento propone una metodología para el pre-procesamiento de las señales de vibración y la extracción de características como insumo para la detección de fallos de maquinaria rotativa. De esta manera, se propone contribuir con datos suficientes para la generación de un modelo y que sirva como base para futuras investigaciones en el campo del mantenimiento basado en la condición.

2. METODOLOGÍA

Las señales adquiridas en una fase previa desde la maquinaria, requieren ser pre-procesadas, pues la intención es incrementar su cantidad y eliminar perturbaciones o valores atípicos que pudieran interferir en el modelamiento. En la Figura 6 se esquematiza los pasos que se explican a continuación.

2.1 Ingreso de las señales

Como ya se mencionó, en un proceso previo se toman las señales de vibración desde la maquinaria rotativa y éstas pueden ingresar directamente desde los dispositivos de adquisición para el pre-procesamiento o también se pueden almacenar en una base de datos.

2.2 División del conjunto de señales

El siguiente paso es la división del conjunto de señales en: señales de entrenamiento, señales de validación y señales de prueba. Esta acción es necesaria, pues en la creación del modelo no se pueden utilizar todos los datos. Es necesario contar con un subconjunto que se pueda aplicar al momento de la generación del modelo, y otros dos para su validación.

En esta fase también se extrae la clase de cada señal de los tres subconjuntos. Es importante puntualizar que la clase hace referencia al nivel de

severidad del fallo, dato necesario para el proceso de clasificación al momento de crear un modelo.

2.3 Ventaneo de la Señal

Las series de tiempo de cada subconjunto son extensas como la que se muestra en la Figura 1, por lo tanto es necesario seccionar en intervalos más pequeños a través de un ventaneo.

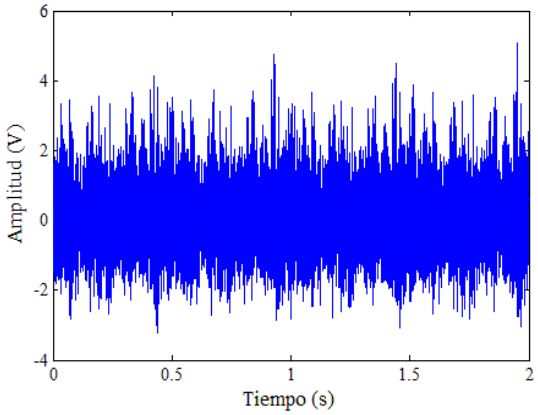


Fig. 1. Señal de vibración

Para este procedimiento se requiere establecer parámetros de ajuste como: el incremento (ΔT), ventana *(w)* y ancho *(ts)*. Cada parámetro cumple una función específica que en conjunto permitirá seccionar la señal en cuantas partes resulte por los valores establecidos. De este modo, el incremento determina cuánto se mueve la ventana a lo largo de la señal, la ventana especifica el ancho de seccionamiento primario de la señal y el ancho indica en cuántas partes se efectúa el seccionamiento secundario; dicho de otro modo, este último parámetro denota el tamaño de las subseñales resultantes.

Para comprender mejor lo descrito, se ilustra en la Figura 2 una porción de la señal. El recuadro en naranja indica el tamaño del seccionamiento primario (w) y el incremento detalla cuánto se va a mover la ventana entre cada seccionamiento. Para esta señal se tiene un incremento (ΔT) igual a cinco que establece que la ventana se desplazará con sobrelapamiento por cinco ocasiones, pues el ancho del intervalo no es igual al ancho de la ventana. El resultado de esta operación es un seccionamiento primario de la señal en cinco partes (Figura 3).

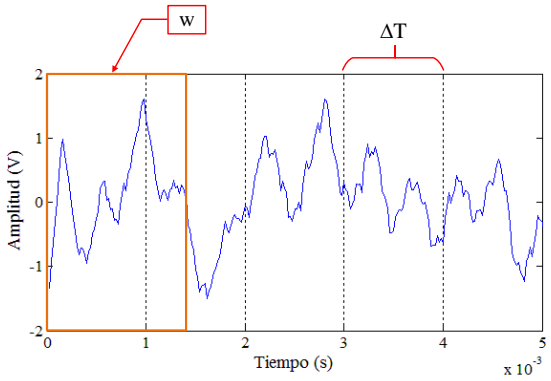


Fig. 2. Parámetros de ajuste primario

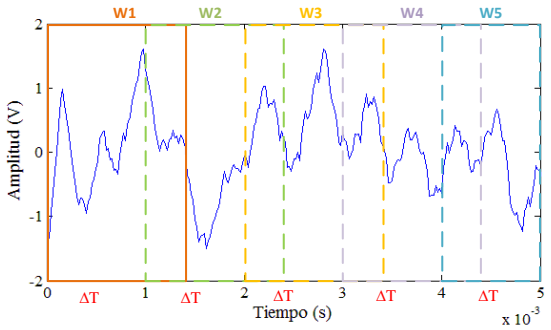


Fig. 3. Ventaneo primario

La señal resultante del seccionamiento aún es extensa, por tanto es necesario realizar un seccionamiento secundario. Para el efecto se toma cada ventada del seccionamiento primario y dentro de éstas, se genera una subdivisión con un ancho definido por ts (Figura 4).

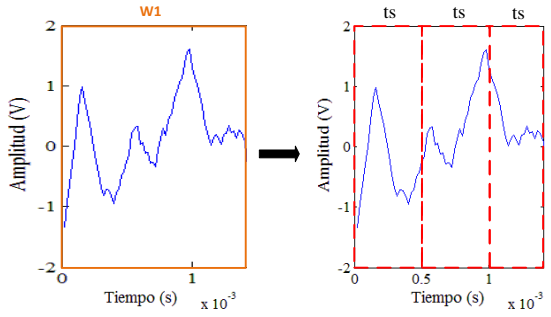


Fig. 4. Ventaneo secundario

El resultado de esta operación es el incremento de señales por cada ventana de seccionamiento. Así para el ejemplo que se ha ilustrado, inicialmente se

hizo un primer seccionamiento en cinco partes, posteriormente de cada ventana se tomó tres subseñales obteniendo al final un total de 15. De esta forma, el procedimiento aplicado ha permitido obtener un conjunto de subseñales a partir de una señal, como se esquematiza en la Figura 5. Es oportuno recordar que el incremento se efectua en cada señal de los tres subconjuntos.

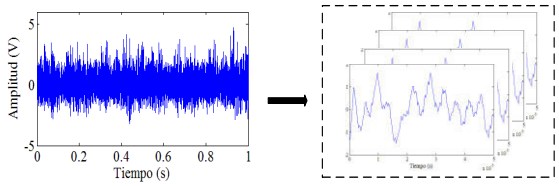


Fig. 5. Resultado del incremento de señales

Luego del incremento de señales, se procede a calcular las características estadísticas que según la bibliografía consultada (Sanchez, 2017) son atributos útiles para la generación de un modelo, ésta son: media, desviación estándar, curtosis, raíz cuadrada media, valor pico positivo, factor de cresta, r media, factor de forma, factor de impulso, varianza y valor mínimo.

2.4 Estandarización de la señal

Para terminar el proceso se estandariza la señal con la finalidad de eliminar valores que no están dentro del rango normal y que pudieran alterar los resultados en el proceso de modelado (principalmente para redes neuronales). Para el efecto se ajusta la señal a una distribución normal a través de la siguiente relación.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \qquad (1)$$

Donde:

z, señal normalizada
x, señal a normalizar
μ, media
σ, varianza

Es importante puntualizar que este procedimiento se aplica únicamente al conjunto de señales de entrenamiento, pues si se toma las de validación y prueba se estaría sesgando el resultado del modelamiento. Esto se da porque en la creación del modelo se utiliza únicamente el conjunto de entrenamiento; no obstante, los valores de la media y de la desviación estándar se aplican también a los otros dos subconjuntos.

Al finalizar este procedimiento, se obtienes tres subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba con la cantidad adecuada de señales estandarizadas que están listas para realizar un posterior modelamiento. En la Figura 6 se resume lo pasos que se han descrito para el incremento de las señales de vibración.

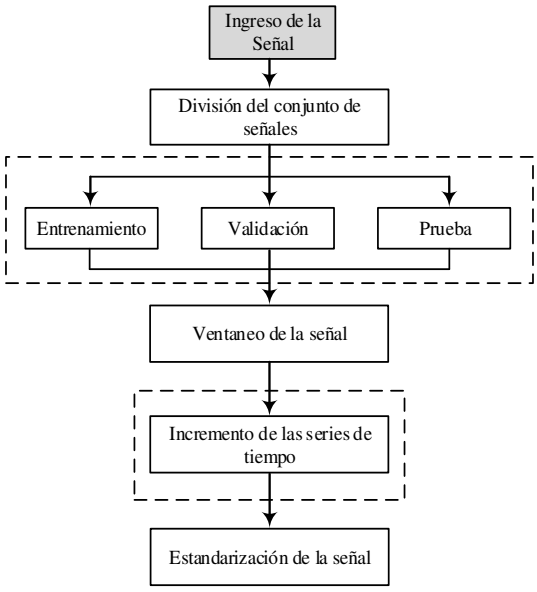
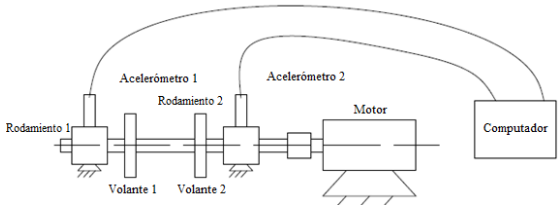


Fig. 6. Procedimiento para el incremento de las señales de vibración. Los rectángulos interpunteados representan resultados y el rectángulo sombreado indica que los datos provienen de otro procedimiento.

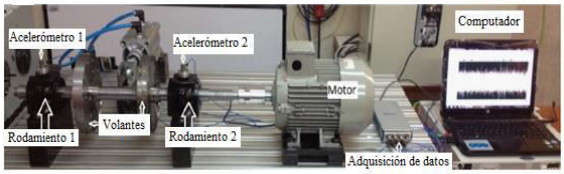
3. EXPERIMENTO

3.1 Base de datos e ingreso de la señal

Para la experimentación se utilizó la base de datos del laboratorio de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, Ecuador. Los datos adquiridos previamente provienen del banco de pruebas mostrado en la Figura 7; siendo importante señalar que la metodología considera las mediciones realizadas en los dos rodamientos.



a) Configuración esquemática



b) Configuración real

Fig.7. Banco de vibraciones

Adicionalmente, la condición de la máquina está referenciada por siete niveles de severidad que se estructuran como se muestra a continuación.

Tabla 1: Niveles de severidad

Nivel de Severidad	*Elementos evaluados*	
	Rodamiento 1	**Rodamiento 2**
P1	Normal	Normal
P2	Fallo en pista interna	Normal
P3	Fallo en pista externa	Normal
P4	Fallo en elemento rodante	Normal
P5	Fallo en pista interna	Fallo en pista externa
P6	Fallo en pista interna	Fallo en elemento rodante
P7	Fallo en elemento rodante	Fallo en elemento rodante

De acuerdo a la tabla 1, el nivel P1 indica que los dos rodamientos están en condición normal, no así el nivel P7 donde se especifica que el rodamiento 1 tiene un fallo en su elemento rodante en combinación con un fallo en el elemento rodante del rodamiento 2. Esta configuración determina la condición de la maquinaria.

Para aplicar la metodología propuesta también es necesario conocer las condiciones establecidas en la adquisición de las señales de vibración. Para el efecto se han realizado cinco repeticiones (R1, R2, R3, R4, R5), con tres frecuencias 8Hz (F1), 10Hz (F2), 15Hz (F3) y con tres tipos de carga (L1, sin carga), (L2, con una carga) y (L3, con dos cargas). Esta configuración experimental ha orientado a la codificación para cada señal en la base de datos. En consecuencia cada una está identificada por la repetición, frecuencia, carga y tipo de fallo. Así la señal R1F1L1P1 detalla que corresponde a la primera repetición, con una frecuencia de 8Hz, sin carga, y con nivel de severidad 1, es decir en condición normal. De esta codificación el último dígito es muy importante, pues se utiliza para la extracción de la clase (nivel de severidad). Con la codificación descrita, el conjunto de señales contenidas en la base de datos son pre-procesadas con la metodología propuesta.

3.2 División del conjunto de señales

La división de los datos se estableció de la siguiente forma: datos de entrenamiento con un 70% del total, datos de validación con el 15% y datos de prueba con el 15% restante. Este proceso se realizó de forma estratificada y aleatoria para proporcionar una distribución homogénea de las señales, de tal forma que se obtengan subconjuntos con la cantidad adecuada y garantizando la presencia de señales con todos niveles de severidad en cada segmento.

3.3 Ventaneo de la Señal

Para el seccionamiento de la señal fue necesario establecer los valores de los parámetros de ajuste que fueron los siguientes:

Ancho (ts) = 100
Incremento (ΔT) = 250
Ventana (w) = 500

3.4 Estandarización

Para la estandarización, a cada señal del conjunto de entrenamiento que correspondió al 70% del total de datos, se aplicó la relación indicada en la sección 2.4, obteniendo una señal ajustada a una distribución normal. Los valores de la media y

desviación estándar se hicieron extensivos para los otros dos subconjuntos.

4. RESULTADOS

Del proceso previo en la adquisición de señales se ha obtenido un total de 315 señales en el dominio tiempo (Figura 8). Esta cantidad proviene del número de pruebas efectuadas por cada nivel de severidad (clase). De esta forma al tener siete niveles, por cada uno se han obtenido 45 señales dando como resultado la cantidad arriba indicada. Con este conjunto de datos se aplicó el pre-procesamiento.

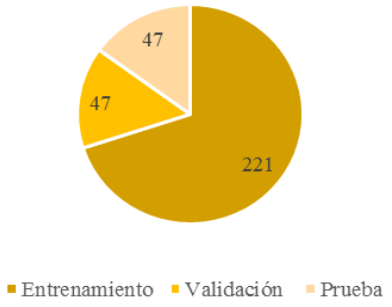


Fig.8. Cantidad inicial de señales por subconjunto

Luego del ventaneo finalmente se obtuvo una cantidad de 429000 señales que están distribuidas de la siguiente forma.

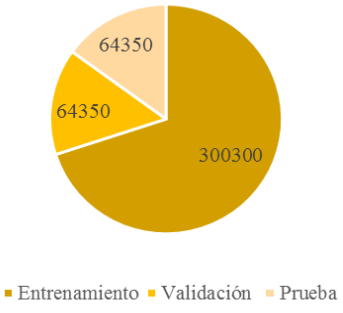


Fig.9. Cantidad de señales por subconjunto después del ventaneo

Finalmente, con el proceso de estandarización las señales de entrenamiento fueron ajustadas a una distribución normal standard, donde su desviación estándar es 0 y su varianza 1.

4. CONCLUSIONES

El proceso descrito ha permitido incrementar el tamaño de datos de 315 señales a 429000 en total y contienen iguales características estadísticas que las originales. Esta metodología aporta en la disminución de tiempo y costo al momento de obtener la cantidad de datos adecuada para la generación de un modelo para la detección de fallos en maquinaria rotativa, sin descartar su uso para otro tipo de maquinaria.

La cantidad de subseñales a obtener depende del valor de los parámetros de ajuste y tiene relación directa con el requerimiento que se proponga para el modelado.

Las señales obtenidas en este procedimiento están estandarizadas y no requieren otro paso previo para la modelización.

REFERENCIAS

Ahmad, R., y Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, *63*(1), 135-149. https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002

Cabrera, D., Sancho, F., Cerrada, M., Sánchez, R.-V., y Tobar, F. (2018). Echo state network and variational autoencoder for efficient one-class learning on dynamical systems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *34*(6), 3799-3809. https://doi.org/10.3233/JIFS-169552

Fugate, M. L., Sohn, H., y Farrar, C. R. (2001). VIBRATION-BASED DAMAGE DETECTION USING STATISTICAL PROCESS CONTROL. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *15*(4), 707-721. https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1323

Goyal, D., y Pabla, B. S. (2016). The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *23*(4), 585-594.https://doi.org/10.1007/s11831-015-9145-0

Jardine, A. K. S., Lin, D., y Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *20*(7), 1483-1510. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012

Kumar, A., Shankar, R., y Thakur, L. S. (2017). A big data driven sustainable manufacturing framework for condition-based maintenance prediction. *Journal of Computational Science*. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.06.006

Sanchez, L.,Vinicio, R. (2017). Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes mediante la aplicación de diferentes técnicas de inteligencia artificial. Recuperado de http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:ED-Pg-TecInd-Rvsanchez

Virtanen, T., Plumbley, M. D., y Ellis, D. (2017). *Computational Analysis of Sound Scenes and Events*. Springer.

Yin, S., Ding, S. X., Xie, X., y Luo, H. (2014). A Review on Basic Data-Driven Approaches for Industrial Process Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *61*(11), 6418-6428. https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2301773

DESARROLLO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS FOR THE MANAGEMENT OF MAINTENANCE IN LABORATORIES OF THE UNIVERSITY OF PAMPLONA

Msc.William Javier Mora Espinosa* **Dr. Bladimir Azdrubal Ramón Valencia*** **Msc. Elkin Alberto Mora Espinosa***

* **Universidad de Pamplona,** Facultad de Ingenierías y arquitectura, Grupo de Investigación GIMUP.
Km1 via Bucaramanga, ciudadela universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
(0375)685303
E-mail: william.mora2@unipamplona.edu.co, hbladimir@unipamplona.edu.co, elkmes@gmail.com

Resumen: El siguiente trabajo presenta el proceso de desarrollo de un sistema de información para gestión de mantenimiento (SIGM) en los laboratorios de la Universidad de Pamplona. Inicialmente se revisó la descripción general de los laboratorios y la gestión actual de mantenimiento. Luego se actualizó el inventario y se realizó la codificación de los equipos. Posteriormente se definió la documentación técnica necesaria y se realizó la jerarquización de equipos mediante análisis de criticidad por método de factores ponderados bajo concepto de riesgo, lo que permitió priorizar las actividades de mantenimiento. La programación se obtuvo como resultado del análisis de modos y efectos de falla (FMEA). Una vez definidos los parámetros, se desarrollaron dos SIGM piloto como trabajos de pregrado en ingeniería mecánica. Las bases de datos se realizaron en lenguaje JAVA y MySQL con ayuda de un programador. Finalmente se implementó el SIGM en cada laboratorio.

Palabras clave: Mantenimiento, sistema de información, gestión de mantenimiento.

Abstract: The following research presents the process of developing an information system for maintenance management (SIGM) in the laboratories of the University of Pamplona. Initially, the general description of the laboratories and the current maintenance management were reviewed. Then the inventory was updated and the equipment was codified. Subsequently, the necessary technical documentation was defined and the hierarchy of equipment was carried out through criticality analysis by means of a weighted factor method under risk concept, which allowed to prioritize maintenance activities. The programming was obtained as a result of the analysis of failure modes and effects (FMEA). Once the parameters were defined, two pilot SIGMs were developed as undergraduate jobs in mechanical engineering. The databases were made in JAVA and MySQL with the help of a programmer. Finally, the SIGM was implemented in each laboratory.

Keywords: Maintenance, information system, maintenance management..

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento llevado a cabo en la mayoria de instituciones se limitan a tareas preventivas básicas como lubricación, calibración y otros ajustes. En este tipo de gestión, las máquinas y otros equipos son reconstruidos ni se realizan reparaciones importantes hasta que el equipo deje funcionar. Esto genera un alto costo de inventario de piezas de repuesto, altos costos de mano de obra en horas extras, excesivo tiempo de inactividad de la máquina y baja disponibilidad (Mobley R.K., 2004). Es alli donde se debe atacar el problema haciendo uso de herramientas como los SIGM o *computerized maintenance management systems* (CMMS), que optimicen el proceso de planificación, ejecución, evaluación y mejora del mantenimiento (Kullolli, 2008.) y permitan obtener una mayor productividad, costos reducidos y una utilización efectiva de activos (Durán, 2011.)

Una vez desarrollado los SIGM, estos permiten una correlación de datos estructurada ajustada a las necesidades de la empresa, recopilando, elaborando y distribuyendo la información para definir las actividades de dirección y control, apoyando los procesos de toma de decisiones (Duffuaa *et al*, 2000). Un sistema, está compuesto de varios módulos interactuando entre sí, facilitando el flujo de información entre tareas, principalmente las de control de fallas/averías, programación de las revisiones y tareas de mantenimiento preventivo, control de mínimos y máximos de Stocks de repuestos y la emisión y seguimiento de las Ordenes de Trabajo (OT) para supervisión y ejecución del mantenimiento. (García Garrido, 2012).

El objeto de este trabajo es desarrollar una metodologia para disenar un SIGM que se adapte a las necesidades de los laboratorios de la Universidad de Pamplona, permitiendo el contro y conservación de equipos y el aprovechamiento de los recursos humanos y tecnologicos disponibles a nivel interno.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Materiales.

Los insumos para el desarrollo de este trabajo se tomaron de las necesidades actuales de los laboratorios de la Universidad de Pamplona, teniendo en cuenta para la prueba piloto los que pertenecen a Ingeniería mecánica e ingeniería de alimentos. El primero se divide en: laboratorios de ensayo de materiales, mecanizado y plásticos, máquinas herramientas, soldadura, simulación y termofluidos; el segundo se divide en: laboratorio de control y calidad, lácteos, cuarto de máquinas, vegetales, fisicoquímica, carnes y cereales.

El mantenimiento en la Universidad se coordina mediante la oficina de recursos físicos y apoyo logístico realizando la programación del mantenimiento general de la institución en el formato FGI-01 “Programación de Mantenimiento Preventivo”; esta programación se realiza teniendo en cuenta las necesidades, especificaciones y condiciones de los equipos registradas en el formato FGI-64 “Hoja de Vida Equipo, FGI-71 “Hoja de Vida Infraestructura Física” o FGI-69 “Hoja de Vida Vehículo”. (www.unipamplona.edu.co, 2018)

2.2 METODOS

2.2.1. Proceso de gestión de mantenimiento institucional.

Las tareas se inician con la planeación del mantenimiento para determinar los elementos necesarios acorde a las solicitudes tales como (material, mano de obra y/o herramienta). Luego según cada caso se cuantifica el costo total y se realiza la solicitud de Materiales al líder del proceso remitiendo el FDE.VA-15 “Estudio de Conveniencia y Oportunidad - Requerimientos de Bienes” y el FDE.VA-16 “Estudio de Conveniencia y Oportunidad - Requerimientos de Servicios” y la solicitud de disponibilidad

presupuestal. Si en la solicitud se requiere contratación de mano de obra y es aprobada se procede según lo descrito en el PDE.VA-07 "Solicitud para Prestación de Servicios Personales" y finalmente para realizar el mantenimiento preventivo el personal procede de acuerdo a la previa programación registrada en el FGI-01 "Programación de Mantenimiento Preventivo". (www.unipamplona.edu.co, 2018)

2.2.2. Incorporación del Sistema de información

El objetivo es optimizar los procesos que se llevan a cabo actualmente mediante el uso de un software de gestión de mantenimiento diseñado por los estudiantes una vez recopilada la información requerida como inventarios, flujo de información, formatos, condiciones actuales, entre otras. Este software almacena la información sobre los equipos y herramientas, las operaciones programadas de mantenimiento preventivo (lubricación, mantenimiento autónomo, e inspecciones periódicas), así como historial de intervenciones. Una vez registrada y actualizada la información se logra administrar y controlar todos los procesos de una manera eficiente, redundando en un funcionamiento confiable y ajustado a los requisitos operacionales.

Los pasos para desarrollar el sistema de información para gestión del mantenimiento (SIGM) se describen en la figura 1.

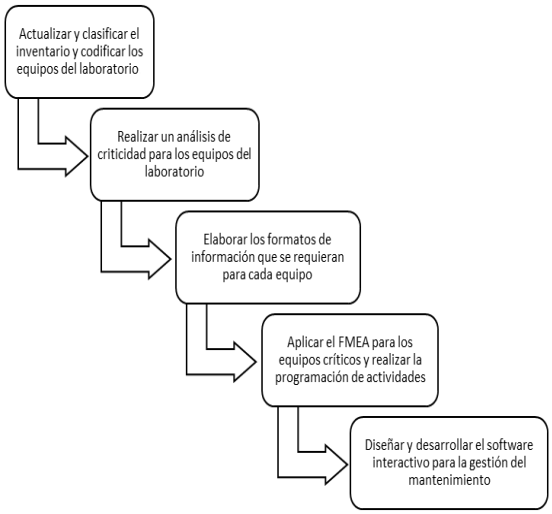


Fig. 1. Proceso de elaboración del SIGM.

2.2.3. Descripción del proceso.

En la primera etapa se revisa el inventario actual y se verifica cada uno de los equipos, herramientas o locaciones para definir su estado, características y condiciones acorde a su contexto operacional. Para esta etapa se utiliza una tabla con: Numero inventario, cantidad, equipo, marca, modelo, serie, fecha de compra, valor, ubicación, estado y observaciones.
En la segunda se cuantifican los hallazgos mediante un análisis de criticidad de factores ponderados bajo el concepto de riesgo (Parra, 2008), jerarquizando los equipos y definiendo las prioridades, para esto se evalúan los parámetros de acuerdo a la ecuación 1.

$$Criticidad\ Total = Frecuencia\ de\ fallas\ x\ Consecuencia$$
$$Consecuencia = ((impacto\ Operacional\ x\ Flexibilidad) + Costos\ Mtto. + Impacto\ SAH)\ (1)$$

En la tercera etapa se revisan los formatos utilizados actualmente y se realizan las mejoras, también se diseñan nuevos formatos que provean mayor información al historial de los equipos.

En la etapa 4 se aplica el FMEA, convirtiéndola en una de las etapas más importantes en el proceso ya que requiere de una investigación exhaustiva de los componentes y características de cada uno de los equipos a evaluar, es aquí donde se debe reunir toda la información disponible en manuales, folletos, facturas, registros y entrevistas al personal de mantenimiento, de modo que se pueda identificar adecuadamente los modos, efectos, consecuencias, severidad, detección de falla de cada uno, las estrategias de intervención y las acciones de mejoramiento (Wang, Cheng, Hu, & Wu, 2012) .

Finalmente se realiza la programación de las actividades acorde a los hallazgos y se procede generar el bosquejo de las ventanas requeridas y del flujo de información. Estos datos son los requeridos por el programador quien desarrolla el sistema apoyado en el lenguaje de programación más adecuado a las necesidades.
Una vez diseñado el SIGM se procede a realizar las pruebas y ajustes necesarios para su implementación.

3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Actualización de inventario y codificación

Para una mejor organización del inventario en los laboratorios se adopta una codificación propia y se compara con la institucional. La estructura del código consta de tres factores: la ubicación, nombre, cantidad como se observa en la figura 2.

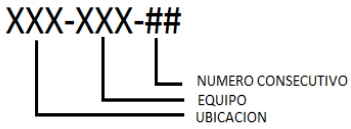


Fig. 2. Estructura del código

El resultado de esta fase es un nuevo inventario actualizado de todos los equipos que pertenecen a los laboratorios con un código asignado como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Codificación e inventario

CÓDIGO	EQUIPO	MARCA	MODELO	ESTADO
01-ESM-001	ESMERIL	DEWALL	DW752-B3	BUENO
01-ESM-002	ESMERIL	DEWALL	DW752-B3	BUENO
01-ESM-003	ESMERIL	VICTOR NEDALLIST	350 HD - DLX	MALO
01-ESM-004	ESMERIL	VICTOR NEDALLIST	350 HD - DLX	MALO
01-FRE-001	FRESADORA	KONDOR	3 VH	BUENO

Se logró identificar algunos equipos que aún estaban en inventario y que fueron dados de baja, también algunos que no se encontraban incluidos, se verificó su estado y se realizaron las observaciones correspondientes.

3.2 Análisis de Criticidad.

Para todos los equipos se obtuvo el nivel de criticidad asi: No Critico (NC), Medianamente Critico (MC) o Critico (C), teniendo en cuenta la matriz de criticidad mostrada en la figura 3. Los resultados para algunos equipos se muestran en el ejemplo de la tabla 2.

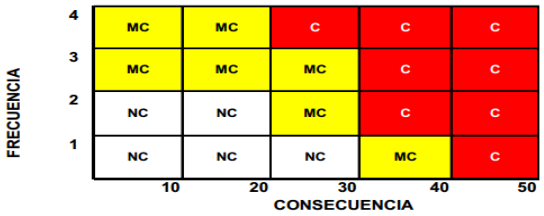


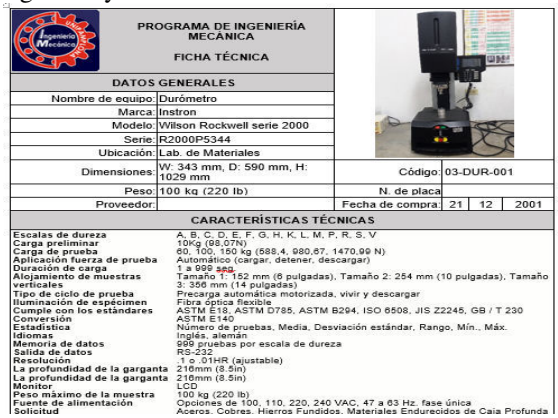
Fig. 3. Matriz de criticidad.

Tabla 2. Criticidad equipos lab. vegetales

CODIGO	NOMBRE	C	F
VEG-AGI-01	**AGITADOR METALICO DE 2 PALETAS**	3	3
VEG-BAS-01	**BASCULA DE 300 KG**	6	4
VEG-BAS-02	**BASCULA DE 300 KG**	6	4
VEG-COR-01	**CORTADORA DE BOCADILLO**	6	4
VEG-CUA-01	**CUARTO FRIO**	32	2
VEG-CUT-01	**CUTTER**	25	2
VEG-DES-01	**DESPULPADORA GRANDE**	6	2
VEG-DES-02	**DESPULPADORA PEQUEÑA**	6	2
VEG-DOS-01	**DOSIFICADOR**	3	2
VEG-EST-01	**ESTUFA INDUSTRIAL**	9	1
VEG-EST-02	**ESTUFA INDUSTRIAL**	9	1
VEG-EST-03	**ESTUFA INDUSTRIAL**	9	1
VEG-FRE-01	**FREIDORA**	12	4

3.3 Elaboración de Formatos.

Los formatos utilizados por la universidad están asociados al sistema de gestión de calidad y solo se le proponen ajustes en la nueva versión, pero también se diseñaron algunos formatos que complementan el proceso de recolección de información para la hoja de vida del equipo, entre ellos están: Ficha técnica, orden de trabajo, hoja de vida, solicitud de préstamos, mantenimiento autónomo y rutinas de mantenimiento. Dos ejemplos de estos formatos se observan en las figuras 4 y 5.



PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

FICHA TÉCNICA

DATOS GENERALES					
Nombre de equipo:	Durómetro				
Marca:	Instron				
Modelo:	Wilson Rockwell serie 2000				
Serie:	R2000P5344				
Ubicación:	Lab. de Materiales				
Dimensiones:	W: 343 mm, D: 590 mm, H: 1029 mm	Código:	03-DUR-001		
Peso:	100 kg (220 lb)	N. de placa			
Proveedor:		Fecha de compra:	21	12	2001

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Escalas de dureza	A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S, V
Carga preliminar	10Kg (98.07N)
Carga de prueba	60, 100, 150 kg (588,4, 980,67, 1470,99 N)
Aplicación fuerza de prueba	Automático (cargar, detener, descargar)
Duración de carga	1 a 999 seg.
Alojamiento de muestras verticales	Tamaño 1: 152 mm (6 pulgadas), Tamaño 2: 254 mm (10 pulgadas), Tamaño 3: 356 mm (14 pulgadas)
Tipo de ciclo de prueba	Precarga automática motorizada, vivir y descargar
Iluminación de espécimen	Fibra óptica flexible
Cumple con los estándares	ASTM E18, ASTM D785, ASTM B294, ISO 6508, JIS Z2245, GB / T 230
Conversión	ASTM E140
Estadística	Número de pruebas, Media, Desviación estándar, Rango, Mín., Máx.
Idiomas	Inglés, alemán
Memoria de datos	999 pruebas por escala de dureza
Salida de datos	RS-232
Resolución	.1 o .01HR (ajustable)
La profundidad de la garganta	216mm (8.5in)
La profundidad de la garganta	216mm (8.5in)
Monitor	LCD
Peso máximo de la muestra	100 kg (220 lb)
Fuente de alimentación	Opciones de 100, 110, 220, 240 VAC, 47 a 63 Hz, fase única
Solicitud	Aceros, Cobres, Hierros Fundidos, Materiales Endurecidos de Caja Profunda

Fig. 4. Ficha tecnica de un equipo

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA RUTINAS DE MANTENIMIENTO			
Equipo	Componente	Actividad	Frecuencia
Centro de mecanizado CNC	General	Realizar limpieza general de la máquina interior y exterior.	Anual
	Mecánicos	Lubricar las guardas telescópicas con aceite hidráulico delgado	Semanal
		Engrasar el mecanismo de cruz de malta del magazín de cambio de herramientas.	Semestral
		Verificar la nivelación de la máquina.	Anual
		Limpiar y engrasar la cadena del cabezal.	Semestral
		Desmontar las guardas telescópicas y limpiar las guías lineales y tornillos de bolas, verificar que la lubricación llegue a estos. Lubricar las guardas con aceite hidráulico delgado.	Anual
		Desmontar y limpiar el ventilador del motor del husillo. Verificar la tensión de la correa del husillo.	Anual
		Calibrar la precisión de los ejes X, Y, Z.	Anual
	Lubricación	Limpiar el tanque de refrigerante.	Semestral

Figura 5. Rutina de mantenimiento para CNC

3.4 Evaluación de equipos por FMEA

El análisis de modos y efectos de falla para cada equipo consistió en la búsqueda de información tanto de las fallas o daños ocurridos o de los que pueden ocurrir. Una vez recolectada la información se procede a elaborar los formatos FMEA y se definen las actividades que se deben realizar para corregir cada una de las fallas.

La identificación de los modos, consecuencias y causas de falla se realizó mediante manuales de fabricante, guías e informes de equipos con características similares y entrevistas con los encargados de cada laboratorio. El formato FMEA elaborado para una falla en uno de los equipos se muestra como ejemplo en la figura 6.

EQUIPO	FUNCION PRINCIPAL	FUNCION SECUNDARIA	CAUSA	MODO DE FALLA	CONSECUENCIA DE FALLA	S	O	D	NPR	Acciones recomendadas	Responsable
Marmita de gas	Procesar alimentos	Mantener presion y temperatura	Suciedad en el ducto	Sistema de alimentación de gas obstruido	sobrepresión	5	7	8	280	Generar vacio en el ducto para extraer impurezas (mensual)	Operario

Figura 6. Tabla FMEA.

3.5 Diseño del SIGM

El Sistema de Información para los laboratorios de la Universidad de Pamplona permite almacenar, clasificar, administrar y retroalimentar información para tomar decisiones referentes al control del mantenimiento de los laboratorios.
En su proceso de diseño se analizaron diversas opciones para las plataformas de entorno de programación y administradores de bases de datos, finalmente se usaron XAMPP, NetBeans IDE, PENCIL PROJECT y MySQL Workbench.
Los requerimientos del sistema se definieron como lo muestra la tabla 3.

Tabla 3. Requerimientos del SIGM

REQUERIMIENTO	DESCRIPCIÓN
Información de activos	Permite llevar información detallada de los laboratorios y por ende de los equipos y recursos, así como registros de actividades e información relevante para la gestión del mantenimiento.
Programas de mantenimiento	El sistema de debe permitir la programación, administración y control de rutinas de mantenimiento de las máquinas y equipos.
Ordenes de trabajo	La creación de órdenes de trabajo es importante para llevar un historial de mantenimiento de cada máquina.
Solicitudes, seguimientos y requerimientos	Permite generar solicitudes y requerimientos para llevar una gestión sobre los laboratorios de manera eficiente e integrada con el funcionamiento interno de la universidad.
Prestamos de recursos y control de equipos	Permite llevar el control de cada uno de los préstamos de los recursos para una mayor organización y control de los activos

Posteriormente se definieron las variables de entrada y de salida como lo muestran las figuras 7 y 8.



Figura 7. Variables de entrada



Figura 8. Variables de salida

Luego se inicia con la creación de los módulos, submódulos y formatos que lo conforman. Para este proceso se crean diagramas de flujo para facilitar la labor del programador como lo muestra la figura 9.

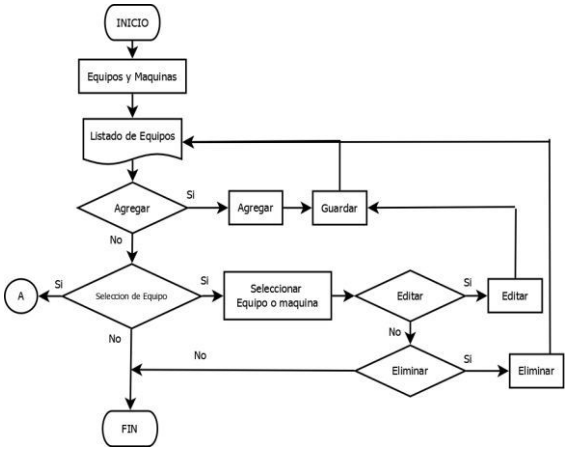


Figura 9. Diagrama de flujo módulo Equipos

Una vez generados todos los diagramas se procede a crear los entornos de cada SIGM, para este caso el Sistema de Información para Ingeniería Mecánica Universidad de Pamplona (SIIMUP) y el Sistema de Información para Ingeniería de alimentos Universidad de Pamplona (SIIAUP), estos entornos se muestran en la figura 10.



Figura 10. Entorno SIIAUP y SIIMUP

Finalizada la programación de las ventanas que requieren los SIGM se realiza el proceso de ajuste mediante la alimentación de los datos y las pruebas de los enlaces. Por último, se implementan en cada dependencia, Las figuras 11, 12 y 13 muestran el resultado de algunos de los módulos de cada sistema.

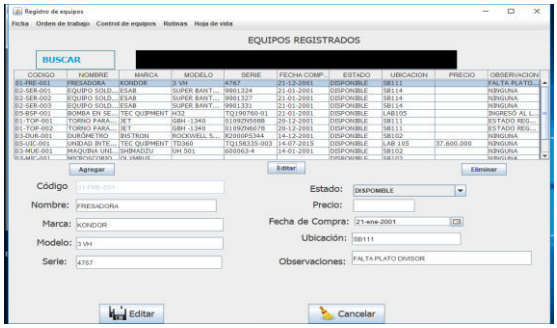


Figura 11. Registro de equipos SIIMUP



Figura 12. Ficha técnica SIIMUP

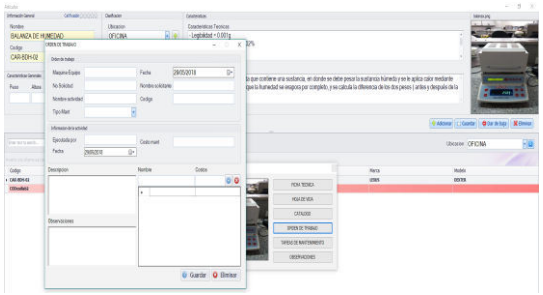


Figura 13. Registro de equipo y Orden de trabajo SIIAUP.

Los diferentes módulos del SIGM permiten obtener fácilmente datos de todos los equipos respecto a: ubicación, características técnicas, manuales de operación, registro de mantenimientos e históricos que se van anexando en su respectiva hoja de vida. Igualmente permite llevar de manera rápida, organizada y actualizada el inventario de cada laboratorio, llevando un control del estado de cada laboratorio y sus equipos.

4. CONCLUSIONES

Se demostró la viabilidad de los SIGM para el control y conservación de los equipos de los diferentes laboratorios, utilizando como insumos el recurso humano disponible tanto en el programa de ingeniería mecánica como en ingeniería de sistemas para obtener un producto propio y ajustado a los requerimientos institucionales.

La prueba piloto de los dos sistemas ha permitido realizar un proceso de mejoramiento continuo, identificando de esa manera las variables más relevantes a tener en cuenta para el desarrollo de un sistema más complejo que abarque en un futuro todas las dependencias de la universidad.

Esta herramienta permite un control más organizado de los equipos y herramientas en cada laboratorio debido a que los datos son cargados, filtrados y evaluados de manera instantánea, eliminando en gran parte el uso de papelería innecesaria.

REFERENCIAS

Duffuaa S. O., D. C. (2000). Sistemas de mantenimiento, planeación y control. México: Limusa Wiley.

Durán, O. (2011.). Computer-aided maintenance management systems selection based on a fuzzy AHP approach. . *Adv. Eng. Softw. 42. http://dx.doi.org/10.1016/j.*, 821–829.

García Garrido, S. (2012). *Ingeniería de mantenimiento: manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial.* RENOVETEC. ISBN- 13: 978-84-616-5617-2 .

Kullolli, I. (2008.). Selecting a computerized maintenance management system. . *Biomed. Instrum. Technol. 42,* , 276–278.

Mobley R.K. (2004). *Maintenance Fundamentals.* Elsevier Inc. 2nd Edition https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7798-1.X5021-3.

Parra, C. (2008). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC).* España: Ingeman.

Wang, Y., Cheng, G., Hu, H., & Wu, W. (2012). Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.05.009*, 958-965.

www.unipamplona.edu.co. (12 de 07 de 2018). *http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_13/recursos/01_general/10022014/mapa_procesos_2014.jsp*. Obtenido de http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_13/recursos/01_general/10022014/mapa_procesos_2014.jsp

GESTIÓN DE LA CONFIABILIDAD Y OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN UN SISTEMA DE AIRES ACONDICIONADOS EN ZONAS RESIDENCIALES

MANAGEMENT OF THE RELIABILITY AND OPTIMIZATION OF THE ENERGY CONSUMPTION IN A SYSTEM OF AIR CONDITIONERS IN RESIDENTIAL ZONES

MSc. Félix Argeyde Ortiz Garzón
Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica
Km 6 vía Bucaramanga, Norte de Santander, Colombia
317-3633570.
felix.ortiz@unipamplona.edu.co - felixortizgarzon@gmail.com

PhD Luz Karime Hernandez Gegen
Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica
Km 6 vía Bucaramanga, Norte de Santander, Colombia
Lukahege@hotmail.com

MSc. Jose Manuel Ramirez Quintero
Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa de Ingeniería Mecánica
Km 6 vía Bucaramanga, Norte de Santander, Colombia
Ingeniero_josemanuel@hotmail.com

Resumen: El propósito de esta memoria de investigación, es que se fomente la toma de conciencia ante el uso y mantenimiento del equipo aire acondicionado en espacios residenciales, lo cual impacta considerablemente en aspectos personales y ambientales, razón que justifica la relación confiabilidad y consumo ante la eficacia y efectividad. Metodológicamente, se trata de una investigación bajo el paradigma positivista, enfoque de investigación cuantitativo. Se utilizó la técnica de la encuesta, a través del cuestionario como instrumento, de igual manera la observación con la finalidad de expresar los grados de intensidad para jerarquizar características del proceso. Producto de la indagatoria, se destaca como resultados que, en zonas residenciales de Cúcuta, el uso y mantenimiento del equipo aire acondicionado no cumple con estándares básicos, ello deriva un consumo superior de energía, afecciones a la salud de los usuarios, así como contaminación en espacios, lo cual se traduce en costos económicos y ambientales.

Palabras Claves: Consumo energético, gestión de mantenimiento, equipo de aire Acondicionado.

Abstract: The purpose of this research report is to promote awareness of the use and maintenance of conditioned air equipment in residential spaces, which has a considerable impact on personal and environmental aspects, a reason that justifies the relationship between reliability and consumption. The effectiveness and effectiveness. Methodologically, it is an investigation under the positivist paradigm, quantitative research

approach. The technique of the survey was used, through the questionnaire as an instrument, in the same way the observation with the purpose of expressing the degrees of intensity to prioritize characteristics of the process. Product of the investigation, stands out as results that in residential areas of Cúcuta, the use and maintenance of the air conditioning equipment does not comply with basic standards, this derives a higher consumption of energy, affections to the health of the users, as well as contamination in spaces, which translates into economic and environmental costs.

Key words: Energy consumption, maintenance management, air conditioning equipment.

1. INTRODUCCIÓN

La relación entre personas, máquinas y ambiente, interesa a la presente investigación, lo cual infiere especial atención, pues se trata de cómo se gesta la confiabilidad del usuario frente al uso de un equipo considerado cotidiano en hogares y espacios laborales por incidencia de la temperatura ambiental. Se trata del aire acondicionado, artefacto eléctrico que desde 1902 por inventiva y necesidad, abrió la posibilidad real que a través de una maquina específica se pudiera controlar la humedad a través de tubos enfriados, dando lugar al primer módulo de climatización de la historia y que luego de un centenario, la modernidad y adelantos tecnológicos le sitúan como uno de los artefactos de mayor relación con las personas por el confort que genera, creando un ambiente con temperatura agradable que posibilita las diferentes tareas y acciones realizadas por las personas. Pero este estado de relación máquina-usuario, requiere de una gestión de confiabilidad para que los espacios acondicionados a temperatura, sean óptimos, adecuado y de bienestar para los usuarios; y no se conviertan en equipos consumidores de energía excesiva y unidades contaminantes por efectos de poco o ningún mantenimiento, lo que convierte un estado ideal en un problema con serias consecuencias incluyendo las ambientales.

2. LA COTIDIANIDAD FRENTE USO Y MANTENIMIENTO DEL AIRE ACONDICIONADO.

El hombre ante la modernidad y lo que supone la inventiva como cimientos para crear condiciones adecuadas en pro de las personas, generan constantes ideas que en el transcurrir del tiempo se convierten en hechos que se sitúan como relaciones directas entre la vida de los sujetos y su cotidianidad. En este transitar, el aire acondicionado se ha convertido en unos de los aparatos eléctricos de mayor uso en zonas residenciales y espacios laborales, para (Miranda y Domenech, 2015)," el aire acondicionado es aquel electrodoméstico que procesa el aire ambiente, enfriándolo, limpiándolo y controlando de manera simultánea la humedad del mismo al momento de salir" (p.13). Es el proceso de tratar el aire, de tal forma, que se controle al mismo tiempo su temperatura, humedad, limpieza y distribución para crear confort en un recinto, de allí la relación máquina-sujeto, la cual implica equipo y uso adecuado para el bienestar del usuario.

En tal sentido, gestar la confiabilidad en aires acondicionados hace referencia a la capacidad de que estos equipos realicen su trabajo, en un tiempo requerido sin que se perturben las condiciones a la que estuviera programada. La confiabilidad según (Mora 2009) "se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña durante un periodo de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno" (p.95). La confiabilidad de un equipo o de sus componentes se analiza con base en la tasa de fallas. La cual varía a lo largo de la vida útil del equipo y se relaciona directamente con la condición del mismo en función de su edad, en dicho proceso imbrican tres momentos importantes (Arranque, operación normal y desgaste). Para este cometido de confiabilidad, el mantenimiento del artefacto es determinante, realizarlo de manera inadecuada o no hacerlo, destaca las fallas más comunes del equipo y las consecuencias subsiguientes tanto para las personas como el ambiente, como acción contaminante reiterativa.

En tal caso, la mantenibilidad del equipo aire acondicionado debe ser periódica, debidamente realizada y con conocimientos básicos en cuanto al uso y mantenimiento, pues lo contrario no solo afecta la

confiabilidad, sino que incrementa el consumo de energía y por ende la economía del poseedor. La falta de mantenimiento hace que la corriente eléctrica se incremente directamente proporcional con la energía, debido a que el aparato trabajará más para cumplir con la temperatura a la que está programado. De igual forma afecta la confiabilidad del confort del recinto, pues las garantías son mínimas al no tener el control del equipo. Lo anterior deriva, que por el simple hecho de encender el equipo y medianamente cumplir la función, no se tiene un artefacto en buen estado, todo lo contrario, está acción genera un espacio contaminando y un desgaste mayor en la unidad. El argumento deja claro la necesidad urgente de toma de conciencia ante el uso y mantenimiento de todo artefacto eléctrico, ello pudiera ser el punto de partida de una economía racional y de un disfrute del equipo en favor de un ambiente sano.

El mantenimiento en esencia para (Duffuaa y Dixón, 2002) "debe ser preventivo y programado, controlado por el tiempo de uso, y respaldado por el histórico de reparaciones y comportamiento del equipo, lo cual reduce la posibilidad de ocurrencia de fallas" (p.14). Estas acciones impactan en la confiabilidad del equipo, por tanto, las mediciones constantes, la observación del proceso, el reemplazo de piezas de manera adecuada, así como la intervención de una persona con conocimientos, hace que el periodo de vida del equipo aumente, al igual que su rendimiento y cumplimiento de los fines básicos del aire acondicionado.

La incidencia de estas variantes hace que existan equipos que lejos de una ambiente agradable y limpio, se conviertan en serios focos de contaminación y de efectos adversos para la salud para (Castellón 2017), en aire acondicionado sucio genera en su ciclo, hongos y bacterias que son inhaladas por los usuarios, ello hace que disminuyan las barreras defensivas del epitelio bronquial haciéndole más vulnerable a las infecciones tanto bacterianas como virales. También la inhalación directa de aire frío y sucio en personas susceptibles puede desencadenar rinorrea intensa y una crisis de broncoespasmo en personas asmáticas. Otro factor es el ruido provocado por los aparatos, las piezas internas sufren desgaste, alteraciones que producen sonidos que contaminan el ambiente y se convierten en barreras que no son propias de un equipo cuyo propósito es generar bienestar.

Con base en lo expresado la presente investigación tiene como objetivo Evaluar la gestión de confiabilidad y optimización del consumo energético en un sistema de aires acondicionados en zonas residenciales y laborales en San José de Cúcuta, Departamento Norte de Santander. Con la finalidad de conocer el comportamiento del usuario frente al uso y mantenimiento del equipo, así como impulsar la toma de conciencia de los sujetos ante la acción, lo cual se traduce en afecciones para las personas e impacto negativo para el ambiente.

Un método para acercarse a la realidad.

En la investigación científica, la actividad de conocer de acuerdo con (Méndez, 2006) "es un proceso intelectual por el cual se establece una relación entre quien conoce y el objeto conocido" (p.3). En tal sentido, el conocimiento que el individuo tiene de la realidad depende de su interés personal; así, el grado de conocimiento adquirido difiere del alcanzado por otras personas sobre el mismo objeto. El conocimiento es un modelo de mundo que deriva de la realidad, y acercarse a ella implica que el investigador se asista de un método apropiado, para inducir un proceso que permita un aporte sustantivo relevante que interesa a los colectivos implícitos en dicho fenómeno.

Para tal fin, la investigación científica cobra valor preponderante, como proceso formal, sistemático e intensivo de llevar a cabo el método científico. Para ello una indagatoria detallada, cuidadosa, fundamentada y crítica de los hechos presentes en la realidad, modelan una manera particular de ver los hechos y acontecimientos, con la finalidad de describir dicha situación y desde la reflexión de las acciones, hacer aportes trascendentales para el conocimiento y la ciencia. Siendo así, es a través del proceso de investigación que se pueden demostrar, analizar, interpretar y emitir juicios cercanos a hechos que circundan en una realidad llena de matices y posiciones varias de acuerdo con las experiencias, percepciones, concepciones y la cosmovisión de quien realiza la investigación y de quienes interviene en dichos propósitos investigativos.

Por tanto, en pro de acercarse a un hecho comprobable, desde el estudio que se presenta, se realizó una investigación en atención al paradigma positivista, para (Stracuzzi y Pestana, 2007), "dicho fundamento paradigmático percibe la uniformidad de los fenómenos, aplica la concepción hipotética- deductiva, destaca el dato y busca la verificación empírica de los hechos y sus causas" (p.40). Estos cimientos de investigación se enmarcan en el enfoque de investigación cuantitativo, (Tamayo 2000), donde el investigador recoge datos cuantificables, verificables a través de técnicas e

instrumentos propios del método inducido. Bajo este enfoque de investigación, la medición del fenómeno permite la posibilidad de generalizar los resultados y deriva la comparación entre estudios similares.

Para este recorrido metodológico, se realizó una encuesta, a través de la aplicación de un cuestionario tipo escala métrica y de intervalos, con la finalidad de conocer las frecuencias y valores ante las aplicaciones realizadas. Asimismo, desde la observación se realizó toma de notas de aspectos que interesan a la investigación con la finalidad de contrastar con los datos ofrecidos por los usuarios.

En la acción de campo, la muestra por conglomerados definida por (Stracuzzi y Pestana, 2007) " como aquella que agrupa físicamente las unidades de análisis cuando se encuentran dispersas en grandes áreas de terreno" (p.123) seleccionó espacios geográficos residenciales de Cúcuta donde las personas tienen aires acondicionados de uso diario, a su vez de destacan segmentos denominados subáreas, siendo estos espacios residenciales casas y/o apartamentos para una muestra total de 75 espacios residenciales tomados al azar, donde se aplicó el cuestionario a los usuarios y se realizaron observaciones, luego se seleccionaron 2 espacios con distinto tipo y marca de aire acondicionado, con la finalidad de observar el comportamiento del equipo antes y después de la fase de mantenimiento intencional para efectos de la investigación.

En tal sentido, se recopilaron datos de evaporadoras y condensadoras de aires acondicionados residenciales, para tomar lecturas de consumo en amperios. La mayoría de estos equipos son evaporadoras que trabajan con sistema de agua helada. Se clasificaron de acuerdo al costo y calidad como aparece en la tercera columna de la (tabla 1); por ejemplo, se da el valor de cuatro (4) al equipo de mejor calidad y por ende de mayor precio en el mercado; y uno (1) al equipo más económico en el mercado. Estas escalas de valoración son dadas por el investigador. A cada equipo seleccionado en este estudio, se le realizo un mantenimiento general que consistió en limpieza de equipo en general (filtros, ventiladores, bastidor) y ajustes de la parte eléctrica y mecánica, previo y después, se realizaron las lecturas de consumo del amperaje (amperios), caída de tensión (voltios). En la primera columna están los ítems que muestra la cantidad de equipos a los que se tomaron los datos, la segunda columna muestra la fecha en que se hizo el mantenimiento y se tomó la lectura. La cuarta columna muestra el equipo y el sistema de trabajo ya sea agua helada o expansión directa. La quinta columna muestra la capacidad respectivamente. En la sexta columna aparece la caída de tensión con unidad en voltios. En las siguientes dos columnas subdivididas se muestran los consumos en amperios del antes y después del mantenimiento en cada línea y a su vez se promedia, tal cual se expresa a continuación:

Tabla 1: Registro de datos.

Item	Fecha	Valor relativo equipo	Equipo	Capacid. (Btu/h)	Voltaje (L1-L2) Voltios.	Valores del consumo durante el mantenimiento (Unidad Amperios).					
						Consumo antes del mantenimiento.			Consumo despues del mantenimiento.		
						L1	L2	Promed. input.	L1	L2	Promed. output.
1	21/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	12000	210	5,17	2,6	3,87	4,97	3,1	4,035
2	21/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	36000	209	11,6	10	10,9	10,7	11	10,85
3	21/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	36000	210	9,9	10	10,05	10	10	10
4	21/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	12000	209	3,91	3,8	3,845	3,38	3,5	3,44
5	22/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	24000	209	0,57	0,2	0,385	0,45	0,3	0,375
6	22/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	18000	211	0,44	0,2	0,295	0,39	0,2	0,295
7	22/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	36000	207	0,67	0,5	0,605	0,55	0,5	0,525
8	22/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	24000	207	0,42	0,5	0,455	0,36	0,4	0,38
9	22/04/2016	4	Split expansión directa (condensadora)	12000	209	3,92	4	3,965	3,5	3,9	3,7
10	22/04/2016	4	Split expansión directa (evaporadora)	24000	209	0,71	0,3	0,51	0,6	0,3	0,45
11	22/04/2016	4	Split expansión directa (evaporadora)	12000	208	0,62	0,4	0,515	0,37	0,2	0,285
12	22/04/2016	4	Split expansión directa (evaporadora)	18000	207	0,25	0,4	0,305	0,39	0,5	0,445
13	24/04/2016	4	Split expansión directa (evaporadora)	12000	210	4,65	3,2	3,925	3,81	3,6	3,705
14	24/04/2016	4	Split expansión directa (evaporadora)	36000	208	0,76	0,6	0,655	0,59	0,8	0,695
15	24/04/2016	4	Split expansión directa (evaporadora)	24000	214	0,36	0,5	0,405	0,78	0,9	0,84
16	24/04/2016	4	Split expansión directa (evaporadora)	12000	209	4,09	3,3	3,695	3,97	3,5	3,735
17	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	18000	217	0,1	0,3	0,18	0,1	0,3	0,2
18	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	217	1,12	0,2	0,645	0,39	0,7	0,545
19	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	222	0,42	0,1	0,275	0,52	0,8	0,66
20	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	224	0,52	1,3	0,905	0,65	1,6	1,125
21	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	214	0,71	0,3	0,505	0,63	0,3	0,465
22	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	219	0,23	0,3	0,27	0,38	0,6	0,49
23	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	220	0,38	0,3	0,32	1,16	0,6	0,88
24	21/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	211	0,74	0,5	0,64	1,09	0,9	0,995
25	23/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	217	0,22	0,7	0,44	0,54	0,9	0,72
26	23/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	215	0,39	1,1	0,755	1,32	0,4	0,86
27	23/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	196	0,76	0,2	0,485	0,16	0,6	0,38
28	23/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	9000	199	0,21	0,4	0,29	0,83	0,9	0,865
29	23/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	18000	212	0,19	0,1	0,165	0,67	0,35	0,51
30	23/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	18000	211	0,17	0,1	0,135	0,3	0,2	0,25
31	23/05/2016	3	split sist. Agua helada (evaporadora)	18000	216	0,25	0,2	0,215	0,32	3	1,66
33	23/05/2016	1	split sist. Agua helada (evaporadora)	18000	215	0,13	0,7	0,41	0,27	0,5	0,385
34	25/05/2016	1	split sist. Agua helada (evaporadora)	36000	216	0,63	0,9	0,745	0,92	0,9	0,91
35	25/05/2016	1	split sist. Agua helada (evaporadora)	36000	216	0,31	0,6	0,47	0,78	0,8	0,79
36	25/05/2016	1	split sist. Agua helada (evaporadora)	36000	211	0,75	0,7	0,725	0,72	0,7	0,71
37	25/05/2016	1	split sist. Agua helada (evaporadora)	36000	222	0,82	0,7	0,735	0,45	0,5	0,475
38	25/05/2016	1	split sist. Agua helada (evaporadora)	36000	226	0,82	0,8	0,805	0,66	0,9	0,78

Esta recolección de información desde la observación de equipos sometidos a fases de mantenimiento derivó lo siguiente: las condensadoras cumplen con la hipótesis propuesta para el después del mantenimiento mientras que es el caso contrario para las evaporadoras, dado el incremento en el amperaje promedio.

Estos resultados ponen en controversia la perspectiva de mantenimiento preventivo en los equipos de aire acondicionado de cierta forma, aunque muy mínima, ya que el evaporador tiene un consumo relativamente bajo en relación con la condensadora.

Se tomaron lecturas de la corriente eléctrica en tres condiciones: obstruido, parcialmente obstruido y sin obstrucción. Y además en velocidad alta, media y baja. Esto dio como resultado que cuando está obstruido, el amperaje es menor, mientras que el amperaje es mayor cuando no hay obstrucción y es equivalente a cualquier velocidad ya sea baja, media o alta.

Con estos resultados podemos deducir que después de realizar mantenimiento a un aire acondicionado los amperajes en el ventilador aumentan mientras que el de los compresores disminuye. Es posible que este aumento de amperaje en el ventilador cuando está sin obstrucción, se deba a que las hélices del ventilador transmiten energía al aire para darle impulso, mientras que al estar obstruido la hélice trabajará en vacío, por tanto, solo mostrará el amperaje que consume el motor.

Caso contrario ocurre con el compresor pues al estar obstruidos los serpentines con suciedad, forma una capa aislante afectando la transferencia de calor del recinto hacia el gas refrigerante, disminuyendo así, la ganancia de energía térmica, prolongando el trabajo de la condensadora al durar más tiempo encendida para lograr la temperatura programada en el recinto. De cualquier modo, el consumo de amperaje de un compresor siempre va hacer más alto que el de los demás componentes eléctricos del sistema de aire acondicionado.

Desde lo realizado, a través del método de investigación se tomaron datos relevantes desde los cuestionarios a usuarios y la observación a equipos de aire acondicionado en fase de mantenimiento. Ello sugiere una cantidad de datos y descripciones que al ser sistematizadas derivan en aspectos concluyentes que se expresan a continuación.

3. CONCLUSIONES

El mantenimiento del aire acondicionado en espacios residenciales (casas y apartamentos) es escaso, se sitúa en categoría de mínimo debido a los costos que implica el mantenimiento periódico. No existe una cultura de prevención solo se busca un técnico especializado cuando el equipo no funciona, es decir opera un mantenimiento correctivo; lo cual se traduce en costos mayores para los usuarios.

El funcionamiento de los equipos se va alterando producto del escaso mantenimiento preventivo, ello hace que el consumo de energía eléctrica es mayor, lo cual se convierte en un fuerte impacto para la economía familiar.

El usuario del aire acondicionado residencial tiene conciencia de los problemas de salud que derivan de equipos sin mantenimiento, pero hace caso omiso a recomendaciones vinculantes, todo a causa de costos, disposición de tiempo, olvido y en algunos casos desconocimiento ante el valor del mantenimiento como prevención, lo cual evidentemente afecta la salud del usuario.

Las personas no tienen conciencia del impacto ambiental que produce el uso del equipo y más aún en condiciones extremas por escaso mantenimiento. Ello tiene implicaciones en el consumo global de energía de la zona, además las unidades por descuido derivan sonidos, que afectan la audición y contaminan sónicamente el espacio donde se encuentra. En magnitud mayor, centenares, miles y millones de aires acondicionados funcionando en condiciones desfavorables por su mantenimiento, se convierte en un costo energético importante para el planeta, que cada día sufre los embates a causa del hombre y su impacto en el ambiente.

La confiabilidad y optimización del equipo aire acondicionado se ve afectado, en tal sentido no existe una confiabilidad en cuanto al desenvolvimiento de artefacto eléctrico en condiciones favorables. El uso no es confiable. Al contrario, está conviviendo con una máquina que día tras día genera daños y consecuencias tanto personales como ambientales.

A manera de reflexión, es necesario una toma de conciencia del usuario ante el uso y mantenimiento del equipo aire acondicionado, ello infiere una planificación de mantenimiento, para la construcción de un histórico del equipo que le permita a cualquier técnico tener una visión en tiempo y uso del artefacto.

De igual manera, tener claro que, aunque encienda, apague y medianamente funcione el equipo, ello no implica efectividad y confiablidad, pues puede estar ante un equipo que fácilmente se convierte en un consumidor excesivo de energía, un agente contaminante y peor aún un foco de constante enfermedades respiratorias y bronquiales que lejos de ser un equipo para el bienestar

personas, se convierte en una máquina para el consumo y una barrera para la salud.

REFERENCIAS.

Miranda, A. y Domenech M, A. (2015). El ABC del aire acondicionado. Ediciones Marcombo.

Mora, L. (2009). Equipamiento, operatividad y confiabilidad. Ediciones Omega. Colombia.

Duffuaa, R. y Dixón, M. (2002). Sistemas de mantenimiento, planeación y control. Limusa: México

Castellón, R. (2017). Afecciones físicas y ambientales a causa de electrodomésticos. Publicaciones ambiente y desarrollo. Buenos aires: Argentina.

Méndez, C. (2006). Metodología. Diseño y desarrollo del proceso de investigación. 3ra Edición. Mc Graw Hill. Colombia.

Tamayo, M. (2000). El proceso de la investigación científica. Limusa. México.

Stracuzzi, S. y Pestana, F. (2007). Metodología de la investigación cuantitativa. FEDUPEL. Caracas: Venezuela.

MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM), EN EL BENEFICIO HÚMEDO DE CAFÉ MANUEL SEDAS RINCÓN DE HUATUSCO, VER.

Maintenance centered on reliability (RCM), in the Humid Coffee benefit Manuel Sedas Rincón de Huatusco, Ver.

MIC. Hugo Alfredo Quiroz Vásquez, Dr. Francisco Espinosa Mejía, M.A. Luis Omar Jamed Boza, Dra. Rosario Aldana Franco, Dr. Oscar López Iza

Universidad Veracruzana Facultad de Ciencias Químicas Xalapa
Maestría en Ingeniería de la Calidad
Xalapa Veracruz, México
Cel. 012281083221
Dirección postal:
Lomas del estadio sin número.
Col. Centro. CP. 91000, Xalapa Veracruz, México
Situcomono93@outlook.com, lojb33@gmail.com, raldana@uv.mx,
ysa_oscarml@hotmail.com
Francisco Espinosa Mejía: Tío Lagunes No. 12 Col. Dos Vistas Ánimas
CP 91197, Xalapa Veracruz, México
masterfem_1@hotmail.com, fraespinosa@uv.mx

Mantenimiento

Resumen: El mantenimiento puede definirse como el conjunto de técnicas que conserva los activos fijos de las empresas, para que realicen sus funciones correctamente. A finales del siglo antepasado, las reparaciones que realizaban en los equipos eran de forma manual, con el paso del tiempo fue evolucionando este proceso y se fueron desarrollado nuevas tecnologías para la industria, dando paso a los departamentos de mantenimiento. En los cincuenta apareció el mantenimiento preventivo basado en inspecciones, cambios y ajustes. Los cambios llevaron a sus encargados a una nueva forma de pensar. Posteriormente en los setenta, se desarrollan nuevos procesos donde se toman en cuenta los tiempos de espera para los clientes. Actualmente la confiabilidad y disponibilidad son clave para los procesos productivos. El Beneficio Manuel Sedas Rincón maneja un mantenimiento para incidencias, pero sus indicadores muestran que es ineficiente, presenta fallas de parada en los equipos, convirtiéndose en tiempos de retraso, incrementando el uso de energía y costos de proceso. El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) como metodología, nos apoyará para enfrentar esta problemática, ya que toma en cuenta las causas reales de las fallas, busca eliminar el reproceso, atrasos, tiempos de parada y aumenta la seguridad en el proceso de beneficiado.

Palabras clave: mantenimiento, confiabilidad, mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

Abstract: Maintenance can be defined as the set of techniques that preserve the fixed assets of the companies, so that they perform their functions correctly. At the end of the ancestor century, the repairs that were made in the equipment were manually, with the passage of time this process was evolving and new technologies were developed for the industry, giving way to the maintenance departments. In the fifties, preventive maintenance appeared based on inspections, changes and adjustments. The changes brought their

managers to a new way of thinking. Later in the seventies, new processes are developed where the waiting times for the clients are taken into account. Currently, reliability and availability are key to production processes. The Benefit Manuel Sedas Rincón manages a maintenance for incidents, but its indicators show that it is inefficient, it has failures of stoppage in the equipment, turning into times of delay, increasing the use of energy and process costs. Reliability-centered maintenance (RCM) as a methodology will help us to deal with this problem, since it takes into account the real causes of failures, seeks to eliminate reprocessing, delays, downtimes and increases security in the beneficiary process.

Keywords: maintenance, reliability, maintenance focused on reliability (RCM).

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento puede definirse como el conjunto de técnicas que permiten conservar activos fijos como maquinaria e instalaciones de una empresa, para que realicen sus funciones correctamente el mayor tiempo posible.

Con el paso del tiempo se han desarrollado nuevas tecnologías para la industria, por ello el mantenimiento también ha cambiado, evolucionando de acuerdo a las necesidades de la época.

Durante la revolución industrial las reparaciones que realizaban los operadores eran especialmente para corregir fallas en los equipos, cuando más complejas eran las máquinas se comenzaron a formar los primeros departamentos de mantenimiento (García, 2012).

Los cambios en el mantenimiento han llevado a los encargados del área a una nueva forma de pensar, ya que al ser parte importante en el proceso deben preocuparse también por la calidad al igual que un gerente o ingeniero. En la década de los setenta la industria desarrolla nuevos procesos, técnicas y nuevas expectativas, tomando en cuenta el tiempo de parada como un defecto que produce costos operacionales y aumenta tiempos de espera para los clientes. En la actualidad los conceptos de confiabilidad y disponibilidad son clave para una gran cantidad de sectores productivos (Córdova, 2005).

El área de mantenimiento del Beneficio Manuel Sedas Rincón maneja un manteniendo para incidencias, pero sus indicadores muestran que es ineficiente, presenta tiempos de parada por fallas en los equipos, volviéndose entonces en tiempos de retraso, usando mayor energía, aumentando los costos de proceso. Por lo anterior se considera pertinente estudiar el comportamiento de los equipos que conforman las operaciones de recepción, despulpe y secado, a vistas de mejorar su desempeño, enfocándonos en su fiabilidad y disponibilidad.

A partir de esto se define el problema, argumentando que el mantenimiento actual provoca demasiados tiempos de parada en las operaciones de recepción, despulpe y secado. La falta de un mantenimiento planificado durante los periodos de trabajo repercute en tiempos de reparación que afectan el flujo retrasando el proceso.

2. DESARROLLO

2.1 Beneficiado de café

El café es uno de los productos más importante después del petróleo, cada día se consumen alrededor de mil cuatrocientos millones de tazas, se cultiva en más de 50 países de Sudamérica, América Central y el Caribe, Asia y África. Los principales productores de café son: Brasil, Colombia, Indonesia, Vietnam, México, Etiopia, India, Guatemala, Costa de Marfil y Uganda (Moscoso, 2015).

El beneficiado del café consiste en una serie de pasos para retirar las capas de la cereza del café sin afectar calidad ni rendimiento (Monroig, 2017).

De forma más técnica el beneficiado se define como el proceso mediante el cual se transforma la fruta del café cereza en café oro para ser comercializado. Aunque el beneficiado no mejora la calidad del café,

los errores en esta etapa si la afectan (Chacón, 2001) (Krauss y George, 2002).

2.2 Fallas

Se define a la falla como la incapacidad de los equipos de cumplir con las funciones esperadas por el usuario (Moubray, 2004).

Arzuaga y Gutiérrez, en el 2004, definieron como falla funcional la ineficiencia de un equipo de cumplir su razón de ser de forma estandarizada.

Una falla en el contexto del beneficiado húmedo es, por ejemplo, la incapacidad de un elevador de café cereza al momento de no poder elevar la fruta hasta el área de limpieza, siendo esta una falla funcional.

De acuerdo con Moubray, una falla también puede ser parcial, definiendo falla parcial, como esa falla que afecta al rendimiento, pero no a su función principal.

Por ejemplo, que el elevador de cangilones en lugar de transportar 500 kilogramos de café cereza por hora, solo transporte 400 kilogramos.

2.3 Mantenimiento

Mantenimiento puede definirse como el conjunto de técnicas que permiten conservar activos fijos como maquinaria e instalaciones de una empresa, para que realicen sus funciones correctamente el mayor tiempo posible (García, 2012).

El mantenimiento debe responder a las expectativas actuales, además de brindar seguridad y compromiso con el cuidado del medio ambiente, debe cargar con calidad del producto, disponibilidad de planta y reducción de costos (Moubray, 2004).

Con el paso del tiempo se han desarrollado nuevas tecnologías para la industria, por ello el mantenimiento también ha cambiado, evolucionando de acuerdo a las necesidades de la época.

2.3.1 Mantenimiento correctivo

La primera generación está dada hasta la segunda guerra mundial. En este periodo la industria contaba con maquinaria con diseño sencillo y con fines determinados, sus reparaciones eran básicas por lo que no se necesitaba de mucho personal calificado (Gonzales y Mora, 2006).

En esta etapa la industria no estaba tan mecanizada, por tanto, el tiempo de parada no era tan impactante, así que la prevención de fallas no estaba dentro de las prioridades de la dirección (Ferrans y Salas, 2010).

El mantenimiento correctivo también conocido como mantenimiento a la rotura consiste en reparaciones a medida que se produce, es una actividad de emergencia y consiste en reparaciones cuando el componente deja de funcionar, se repara para que continúe el proceso y se repara nuevamente hasta que falle de nuevo (Rodríguez, 2010).

2.3.2 Mantenimiento preventivo

La segunda generación se dio durante la segunda guerra mundial, la guerra produjo la necesidad de muchos productos y la cantidad de obreros bajo considerablemente. Por ello se necesitó mayor cantidad de máquinas, hacia 1950 se construían máquinas de mayor complejidad y la industria comenzó a depender de estas. Esta dependencia llevo al mantenimiento preventivo, con el interés de disminuir el tiempo improductivo causado por fallas (Gonzales y Mora, 2006).

Un mantenimiento preventivo o basado en tiempos (mantenimiento planificado) consiste en el cambio de piezas en un equipo en un determinado tiempo sin importar el estado en el que se encuentren o si la máquina esté funcionando en ese momento de forma correcta, el objetivo es adelantarse a las posibles fallas de modo que los equipos puedan funcionar satisfactoriamente. Se realiza a razón de la experiencia del personal a cargo, este puede ser señalado por el propio fabricante (Rodríguez, 2010).

Aun así, el mantenimiento preventivo no es el método que reduce fallas a menor costo, la razón es que las fallas no se producen en intervalos de tiempo regulares, se producen dependiendo de una distribución de probabilidad. Este tipo de mantenimiento asentará su estudio en el tiempo medio entre fallas (MTBF) por sus siglas en inglés (Mean Time Between Failures).

El mantenimiento preventivo presenta algunas ventajas como lo son la confianza en la correcta operación y seguridad, menos tiempos de parada, mayor tiempo de vida útil, carga de trabajo uniforme para el área de mantenimiento y determinación de

las posibles causas de fallo, así como definición de debilidades en los equipos. Y desventajas como fallas dentro de intervalos de reparación, desmontar un equipo que se encuentre en buenas condiciones y producir fallas y podría tomar mucho tiempo (Esquivel, 2009).

2.3.3 Mantenimiento predictivo

La tercera generación nace en los años setenta, cuando la industria cambió de forma acelerada, una automatización mayor significa una relación mayor entre la máquina y la calidad del producto. De este modo también se elevan los riesgos cuando una máquina falla (Gonzales y Mora, 2006).

El mantenimiento predictivo, es un tipo de mantenimiento que intenta informar de forma permanente sobre el estado de los equipos e instalaciones, esto mediante el conocimiento de variables como: temperatura, vibración y consumo de energía, estas son tomadas como representativas del estado y operatividad. Este mantenimiento necesita de un gran conocimiento matemático, técnico, físico y tecnológico (García, 2012).

Del mismo modo que crece la dependencia de equipos también crecen los costos de mantenerlos operando. En esta época de impulso se consideraron cambios clasificados en nuevas expectativas, nuevas investigaciones y nuevas técnicas.

En Nuevas expectativas se considera que el tiempo de parada afecta la producción de los activos físicos, aumenta los costos operacionales, y afecta el servicio al cliente.

Una mayor mecanización se traduce como una mayor cantidad de fallas que afectan la capacidad de mantener parámetros de calidad deseables (Moubray. 2004).

En un principio se creía en un comportamiento hasta que en la tercera generación se encontraron seis patrones de comportamiento de falla como lo muestra la figura 1.

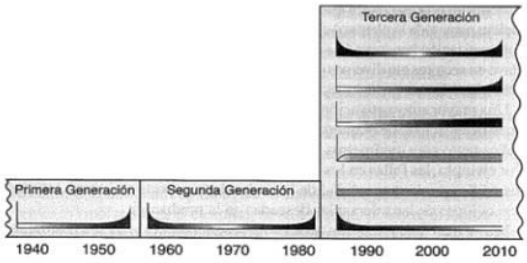


Fig. 1. Patrones de falla de equipo (Fuente: Moubray, 2004).

2.4 Mantenimiento Centrado en confiabilidad

Uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta el personal de mantenimiento es decidir que herramientas y métodos usar de acuerdo a las necesidades de su empresa (Moubray, 2004).

Además, hay funciones fundamentales a considerar en una estructura de mantenimiento como: mantenimiento preventivo, monitoreo de condiciones, administración de reparaciones pendientes, administración de componentes, servicios de reparaciones en taller, historial de reparaciones, análisis de resultados y administración de problemas (Zegarra, 2015).

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) se desarrolló en la industria de la aviación de los Estados Unidos, consiste en analizar el funcionamiento de los activos físicos, conocer cuáles son las posibles fallas, indagar de donde ocurran las fallas, estudiar el efecto de una falla y sus consecuencias, de esta forma se determinarán las mejores estrategias de mantenimiento, dichas técnicas serán las más económicas y efectivas (Esquivel, 2009).

Esta metodología es considerada como un método de evaluación sistemática, basándose en monitoreo, se observa el comportamiento de un equipo a través del tiempo (Ferrans y Salas, 2010).

La metodología RCM además considera la conformación de un equipo de trabajo, tomando en cuenta que quienes lo conformen deben conocer los sistemas, esto incluye al personal operativo y de mantenimiento del equipo.

Villacres propone que el equipo este conformado por: un facilitador, técnicos en electricidad y mecánica, operadores y un administrador del equipo.

Para la aplicación de un RCM además se eligen los equipos que son críticos para el proceso, es decir se define la criticidad de los equipos (Esquivel, 2009).

Al analizar la criticidad se priorizan los equipos, es decir a una alta criticidad se aumentan las tareas de monitoreo y mantenimiento preventivo, de ahí se parte a la búsqueda de fallos mediante un análisis modo y efecto de falla (AMEF) (Torres, 2012).

2.5 AMEF

Entre las herramientas utilizadas por el RCM tenemos el AMEF que es una técnica que tiene como objetivo la búsqueda de todos los efectos de falla y sus causas antes de que ocurran, el proceso para identificar fallos se hace de manera sistemática, asegura que no se malgaste tiempo y esfuerzo en síntomas en lugar de causas reales. Puede ser considerado como una herramienta para detectar y eliminar problemas que afecten el funcionamiento y rendimiento de la organización. Teniendo diferentes tipos de AMEF (Martínez, 2004; Islam, 2010; Pérez y Plata, 2010).

- AMEF de proceso
- AMEF de diseño
- AMEF de proyecto
- AMEF de software
- AMEF de sistema

Con la técnica AMEF además se responden las cinco preguntas del RCM, ya que con estas se identifican y evalúan las fallas potenciales, definiendo fallas como todo aquello que no permite que un activo realice su función correctamente, el RCM las identifica en dos niveles, como circunstancias que llevaron a la falla y eventos que causan que un activo falle (Guerrero, 2010).

2.6 Árbol lógico de decisión

Cuando se conocen las fallas, el RCM utiliza un Árbol Lógico de Decisiones (ALD) que es aplicable después de la identificación de modos y efectos de fallo, sirve como una herramienta sistemática y homogénea para la elección de tareas de mantenimiento más adecuadas que eviten la aparición de una determinada falla en el equipo seleccionado (Gonzales y Mora, 2006).

El ALD permite elegir actividades que cumplan con factibilidad técnica y sostenibilidad, denominándolas como actividades apropiadas. Este diagrama toma en cuenta que cada modo de fallo tiene un camino lógico que puede eliminar o minimizar las consecuencias.

Las tareas de mantenimiento podrían ser, restauración, una sustitución, una inspección, una búsqueda de fallos, una modificación o un "dejar que ocurra el fallo" conscientemente (Sexto, 2010).

2.7 Diagrama de decisión

Una vez obtenida la información, esta se relaciona mediante un diagrama de decisión y así traducirla en tareas de mantenimiento. El primer paso que se necesita para armar este diagrama es, identificar los modos de fallo y sus consecuencias registradas en el árbol de decisión, separando las consecuencias en cuatro grupos; debidas a fallo oculto, para la seguridad y el medio ambiente, operacionales y no operacionales, así una vez relacionadas se procede a generar las propuestas de mantenimiento (Sánchez, 2016) (Barreda, 2015).

2.8 Distribución estadística de fallas

En estadística decimos que una variable tiene una función de probabilidad, de densidad o simplemente función de distribución.

Una función de probabilidad está relacionada con su distribución de frecuencias, podemos decir de hecho que una distribución de probabilidad es la distribución de frecuencia teórica.

Una función de frecuencia teórica es la distribución de probabilidad que describe la variabilidad esperada en los resultados (Badii y Castillo, 2009).

Una distribución estadística de fallas será entonces la probabilidad de ocurrencia de fallos en un determinado periodo de tiempo (Zapata, 2005).

2.9 Distribución Weibull

La distribución Weibull es una distribución de probabilidad muy utilizada para modelar tiempos de falla dada su interpretación y su flexibilidad de ajuste empírico. Esta distribución permite visualizar tiempos desde la primera y segunda falla en un equipo (Jaramillo, 2008).

2.10 Simulación Montecarlo

Una simulación es el proceso de diseñar un modelo para entender el comportamiento de un sistema o evaluar estrategias con ayuda de un equipo de cómputo (Coss, 2003).

La simulación Montecarlo se basa en la generación de números aleatorios con el propósito de simular el comportamiento aleatorio de un sistema, obteniendo así de forma artificial los índices de confiabilidad (Zapata, 2004).

3. MATERIALES Y METODOS

En este apartado se encontrarán los medios usados para la recolección de información y de su respectivo análisis, utilizando criterios estadísticos correspondientes a la técnica usada, Dividiendo este apartado en tres fases como se muestra en la figura 2:



Fig. 2. Diagrama de trabajo metodológico (Fuente: Propia).

La fase I consistió en la selección de los subsistemas críticos del beneficiado húmedo; esta fase tiene la finalidad de delimitar el estudio a los equipos con mayor impacto en el proceso al momento de presentar fallas, dando oportunidad al desarrollo de un análisis mucho más objetivo.

Para identificar la criticidad de los equipos, se recurrió a la aplicación de una encuesta, misma que fue contestada por dos encargados del mantenimiento y un responsable del área de industrialización, haciendo un total de 3 encuestas, contestadas de manera presencial.

A través de esta encuesta se evaluó la frecuencia y efectos de falla y una vez obtenida la información se procedió a calcular los promedios de cada criterio.

Una vez calculada se usó la matriz de criticidad 5X4, mostrada en la figura 3.

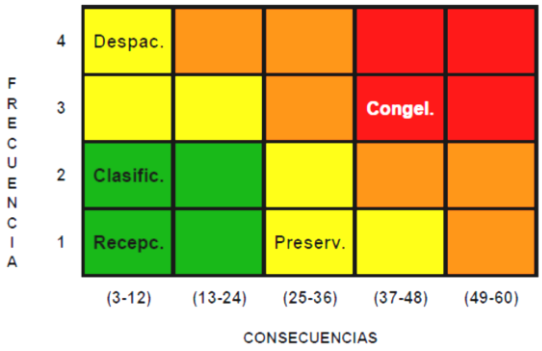


Fig. 3. Matriz de criticidad (Fuente: Villacrés, 2016).

En la fase II los subprocesos fueron analizados para identificar su función principal, sus fallas, causas y efectos de falla en el proceso. Teniendo como primer paso, identificar las funciones de cada uno de los sistemas seleccionados, tomando en cuenta fichas técnicas prestadas por la empresa, descripción del proceso y estándares a cumplir, además de las condiciones de operación de cada equipo.

Utilizando un AMEF armado con respuestas obtenidas de una entrevista semidirigida al personal encargado del área de mantenimiento.

Se calculó el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) de cada equipo seleccionado utilizando el software Microsoft Office Excel 2016.

Con los datos modos de falla, severidad, causa de falla, ocurrencia y detección se determinó el NPR (número de prioridad de riesgo), que indicó el modo de falla de mayor interés para este estudio.

En la fase III llamada construcción del plan de mantenimiento, se armó la propuesta de mantenimiento, se simularon los tiempos de falla y se calcularon de los tiempos de reparación.

Teniendo como primer paso la creación del plan de mantenimiento se usó un árbol lógico de decisión (ALD), con este se determinaron tareas de mantenimiento aplicables identificando las causas intermedias y profundas de un problema principal, este paso se repitió tantas veces como causas de fallas críticas se encontraron en cada uno de los equipos.

Una vez construidos los arboles de decisión se asignaron las tareas de mantenimiento utilizando la hoja de trabajo RCM, para cada equipo en estudio.

Se empleó la simulación de tiempos de falla dado que hay pocos datos reales (porque las instalaciones han sido utilizadas por debajo de su capacidad).

Para esta simulación se tomó en cuenta el número de horas de trabajo de cada sistema hasta su fallo, para el cálculo de estos tiempos se usaron los flujos de materia prima trabajada de acuerdo a la capacidad de cada sistema.

Simulados los tiempos de falla, se calcularon los límites de tiempo idóneos para cada actividad de mantenimiento propuesta, Los tiempos calculados sirvieron para integrar el mantenimiento planteado, de manera que cada falla a la que se le realizó simulación tenga tiempos de mantenimiento preventivo, aquellas a las que no se les realizó simulación, se les asignó un tiempo de mantenimiento preventivo recomendado por el área de mantenimiento.

4. RESULTADOS

Los resultados para este trabajo se organizaron en tres fases, valoración de equipos críticos, identificación de las fallas y los efectos de los equipos críticos y construcción del plan de mantenimiento, coincidiendo con las fases de la metodología.

Obteniendo en la primera fase, de acuerdo al análisis de criticidad, que los equipos que requieren mayor atención, por su alta criticidad, son las despulpadoras, por su mediana criticidad, el sistema eléctrico del área de secado y la caldera, y tomando en cuenta el grado de consecuencia se estudió también los elevadores de café cereza.
La tabla 1, muestra el nivel de criticidad de los equipos en estudio, donde grado de criticidad se representó con colores verde (poco crítico), amarillo (medianamente crítico) y café (crítico).

En la segunda fase aplicada a cada uno de los cuatro equipos seleccionados para el estudio, se encontraron seis modos de fallas, y se calculó el índice de prioridad de riesgo de cada modo de falla.

Comenzando con los elevadores de café cereza que presentaron un modo de falla con dos causas posibles: desgaste de tornillos de cangilones y desgaste de banda. Viendo además que el efecto puede ser desde cambio de línea de materia prima, o esperar hasta la reparación del equipo.

Tabla 1. Resultados de evaluación de la criticidad de equipos.

Equipo	Criticidad	Grado
Elevadores de café cereza	46	
Deshojadoras	8	
Despulpadoras	87	
Seleccionadora de café despulpado	8	
Despulpadoras de repaso	8	
Banda transportadora de café lavado	14	
Elevadores de oreado	28	
Oreadoras	28	
Secadoras	28	
Sistema eléctrico de área de secado	69	
Caldera	68	

Fuente: Propia con datos de la empresa Manuel Sedas Rincón

Continuando con el flujo del proceso se analizó el área de despulpe dando como resultado dos modos de falla y tres causas posibles: discos descalibrados, reventadores descalibrados y residuos que obstruyen la rotación del disco.

El sistema eléctrico de área de secado mostró dos modos de falla con una causa principal cada uno: Rotación lenta de secadoras y Paro de secadora.

El último equipo estudiado fue la caldera que dio como resultado un modo de falla con dos posibles causas: fugas de aire caliente y desabastecimiento de agua para la caldera. Decidiendo estudiar todos debido a que existían solo una o dos causas de falla principales. Terminando así la fase II, obteniendo de manera general los modos de falla de cada equipo.

En la fase III, construcción del plan de mantenimiento, se identificaron las causas superficiales y profundas de cada modo de falla, se creó y propuso un plan de mantenimiento, se simularon los tiempos de falla y se calcularon los tiempos de mantenimiento para los equipos críticos.

Teniendo como primer paso un análisis, utilizando un rbol lógico de decisión (ALD) para cada uno de

los modos de falla, de cada equipo en estudio, con la finalidad de encontrar las causas superficiales y profundas.

El ALD para el modo de falla de los elevadores de café cereza dio como resultado tres posibles causas superficiales (desgaste de tornillos de cangilones, sobrecarga y desgaste de banda) y tres causas profundas (ácidos propios del café cereza, falta de control de flujo de café cereza y corrosión por humedad y calor), de las cuales solo se consideraron dos, dado que sobrecarga es una causa que no es propia del mantenimiento y se carecía de registros de esta.

El ALD para el modo de fallo denominado "café sin despulpar", propio del área de despulpe dio como resultado, tres causas superficiales (discos descalibrados, reventadores descalibrados y variabilidad en el tamaño de materia prima), obteniendo así cinco causas profundas (desgaste natural, falta de grasa en baleros, oxido, la materia prima la trae desde la finca y la limpieza no es eficiente),descartando "variabilidad en los tamaños de la materia prima", dado que es una causa ajena al mantenimiento y con causas profundas externas a la empresa.

El ALD para el modo de falla "parada de rotación de disco dentado", en el área de despulpe mostró una causa superficial (residuos que obstruyen la rotación del disco), con cuatro causas profundas (café cereza con residuos, el personal no la realiza, la limpieza de materia prima no es eficiente, el personal no la realiza), las cuales están relacionadas a la limpieza de los equipos.

El ALD para el modo de falla "rotación lenta de secadoras", propio del sistema eléctrico mostró que la causa superficial es el (desajuste de cartuchos), con cuatro causas profundas (falta de cartuchos de repuesto, tención en cadena de rotación, cartuchos de mala calidad y calor producido durante el trabajo).
El árbol lógico de decisión del modo de fallo "paro de secadora", el cual es propio del sistema eléctrico del área de secado mostró una sola causa superficial (desgaste excesivo del interruptor), con cinco niveles de profundidad (falta de cartuchos de repuesto, tención en cadena de rotación, cartuchos de mala calidad, expansión de ganchos de regulador y sobrecalentamiento de swich de encendido), y se puede notar que tanto para rotación lenta y paro de secadora existen causas profundas comunes, por lo que si se atacan se podrían solucionar ambos modos de fallo.

El árbol lógico de decisiones para la caldera, para la que se maneja el modo de falla "temperatura baja" mostro tres causas superficiales (fuga de aire caliente, desabastecimiento de agua para caldera y falta de pajilla) con cinco causas profundas (grietas en el cuerpo de la caldera, tapas de vapor sucias, fallo eléctrico en la bomba, falta de agua y falla en el ventilador para pajilla).

Una vez identificadas las causas profundas, se procedió a generar tareas de mantenimiento para cada causa superficial, los datos se registraron utilizando la hoja de decisión RCM, en la que se registra el modo de falla, la causa superficial, las consecuencias de la evolución del modo de falla, la tarea propuesta, el periodo como debe realizarse y quien puede realizar la tarea. En esta se observó que el rediseño no es necesario.

Dejando libre el apartado de periodicidad, dado que como siguiente paso se realizó la simulación de los tiempos de falla.

Se recurrió a la simulación gráfica, realizada en el software geogebra 2018 versión libre, para lo que, como primer paso, se obtuvieron los parámetros propios de la distribución Weibull.

La simulación gráfica de los tiempos de falla para los elevadores de café cereza se muestra en la figura 4, con los parámetros encontrados; β= 25.77122522 y α= 101.6906806 determinó que a las 105 horas de trabajo hay una probabilidad del 89.8 % de que se genere una falla.

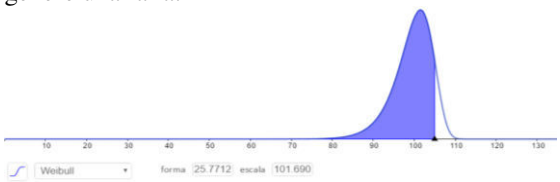


Fig. 4. Matriz de criticidad (Fuente: Villacrés, 2016).

La simulación para la limpieza de base de elevador no se realizó, esto dado no se contaron con datos suficientes, por lo tanto, su tiempo de mantenimiento se asignó de acuerdo con lo recomendado por personal de mantenimiento.
La simulación gráfica de los tiempos de falla para el área de despulpe de café cereza se muestra en la figura 5, con los parámetros; β= 2.589412356 y α=

20.1854383 determinó que a las 28 horas de trabajo hay una probabilidad del 89.99 % de que ocurra una falla.

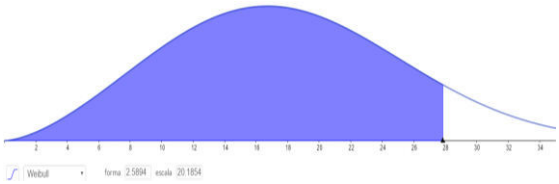


Fig. 5. Distribución de falla de área de despulpe. (fuente: propia con datos de la empresa)

La simulación gráfica de los tiempos de falla para el sistema eléctrico del área de secado se muestra en la figura 6, con los parámetros; β= 1.919058431 y α= 56.0461522 determinó que a las de 86 horas de trabajo hay una probabilidad del 90 % de que ocurra una falla.

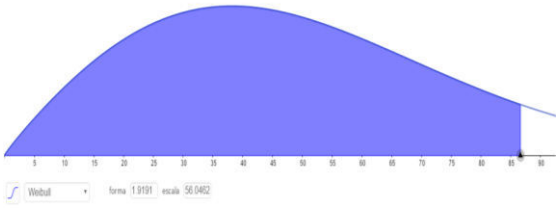


Fig. 6. Distribución de falla del sistema eléctrico de área de secado. (fuente: propia con datos de la empresa)

La simulación para el cambio de switch (interruptor) no se realizó, esto dado que el personal de mantenimiento ajustó solo los componentes internos, por lo tanto, su tiempo de mantenimiento se asignó de acuerdo con lo recomendado por personal de mantenimiento.

La simulación gráfica de los tiempos de falla para el cuerpo de la caldera se muestra en la figura 7, con los parámetros; β= 3.241151167 y α= 202.3346546 determinó que a las de 261 horas de trabajo, hay una probabilidad del 90.04 % de que ocurra una falla.

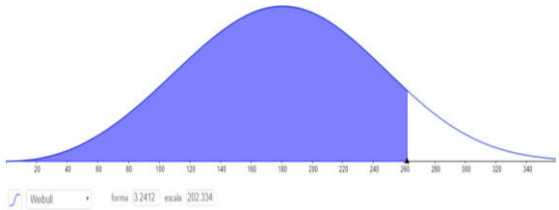


Fig. 7. Distribución de falla del cuerpo de la caldera. (Fuente: propia con datos de la empresa)

La simulación gráfica de los tiempos de falla para el cuerpo de la caldera se muestra en la figura 8, con los parámetros; β= 1.01 y α= 231.2917825 determinó que a las de 528 horas de trabajo hay una probabilidad del 89.99 % de que ocurra una falla.

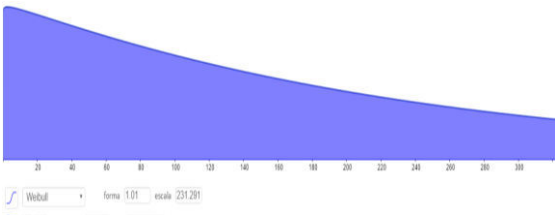


Fig. 8. Distribución de falla de bomba de caldera. (fuente: propia con datos de la empresa)

La simulación para el ventilador de la caldera no se realizó, porque fue imposible realizarlo con un dato, por lo tanto, su tiempo de mantenimiento se asignó de acuerdo con lo recomendado por personal de mantenimiento.

Como último paso, se estimaron los tiempos de mantenimiento para cada equipo analizado, se utilizó el software geogebra 2018 versión libre.

Para calcular la probabilidad de falla en tres determinados tiempos, de este modo se muestran las horas de operación antes de que exista un 70%, 80% y 90% de probabilidad de falla.

Donde el color azul significa un 70% de probabilidad de ocurrencia de falla, el color naranja un 80% de probabilidad de ocurrencia de falla y el rojo un 90% de probabilidad de ocurrencia de falla.

En los intervalos que no tengan un color se coloca un intervalo designado por el personal de mantenimiento, esto dado que no se obtuvieron registros para el cálculo de los tiempos de falla durante el periodo de medición.

En la tabla 2, se muestran las actividades de mantenimiento propuestas con sus tiempos estimados para mantenimiento para los elevadores de café cereza.
Estas actividades deberían ser utilizadas en ambos equipos de las dos líneas dado que de acuerdo a las fichas técnicas que se mostraron por parte del equipo de mantenimiento, ambos elevadores tienen las mismas características.

Tabla 2. Mantenimiento para elevadores de café cereza.

Fuente: Propia con datos de la empresa Manuel Sedas Rincón

En la tabla 3 se muestran los tiempos de mantenimiento asignados a las actividades de mantenimiento para trenes de despulpe. Para el caso del área de despulpe se tomó en cuenta que, ambas actividades se realizan al mismo tiempo, a pesar de que el equipo de mantenimiento recomienda que la limpieza de discos se realice al término de cada turno. Se estimó que a las 27 horas de trabajo existe una probabilidad del 90% de que ocurra una falla.

Falla	Tarea propuesta	Intervalo inicial		
Incapacidad de transportar la cantidad de café para la cual fue diseñado.	Limpieza de la base del elevador al finalizar el turno.	Final de turno.		
	Cambio de tornillos de cangilones y ajuste de banda.	70% 102 horas	80% 103 horas	90% 105 horas

Tabla 3. Mantenimiento para trenes de despulpe.
Fuente: Propia con datos de la empresa Manuel Sedas Rincón

En la tabla 4 se muestran tiempos asignados a las actividades de mantenimiento para el sistema eléctrico de área de secado específicamente de la secadora número 6. Por ejemplo; se estimó que a las 72 horas de trabajo los cartuchos tendrían un 80% de probabilidad de causar una falla.

Tabla 4. Mantenimiento para sistema eléctrico de área de secado.

Falla	Tarea propuesta	Intervalo inicial		
Café sin despulpar.	Calibración de discos y reventadores, engrasado de baleros y chumaceras.	70% 21 horas	80% 24 horas	90% 27 horas
	Limpieza de discos y reventadores.			
Falla	Tarea propuesta	Intervalo inicial		
Desabasto de energía eléctrica.	Cambio de cartuchos.	70% 61 horas	80% 72 horas	90% 86 horas
	Cambio de switch.	Al comienzo de periodo de cosecha.		

Fuente: Propia con datos de la empresa Manuel Sedas Rincón

En la tabla 5 se muestran los tiempos asignados para las actividades de mantenimiento para la caldera. Por ejemplo; para la bomba de suministro de agua para caldera se estima que a las 370 horas existe un 80% de probabilidades de que se produzca un fallo.

Tabla 5. Mantenimiento para caldera.

Falla	Tarea propuesta	Intervalo inicial		
Mayor tiempo para secado de café.	Limpieza de tapas de caldera y Recubrimiento de cuerpo de la caldera.	70% 214 horas	80% 234 horas	90% 261 horas
	Mantenimiento de bomba.	70% 277 horas	80% 370 horas	90% 528 horas
	Mantenimiento de ventilador.	Mensual.		

Fuente: Propia con datos de la empresa Manuel Sedas Rincón

5. CONCLUSIONES

El RCM es una metodología que puede reducir los tiempos de reparación de los equipos durante el periodo operacional, debido a que, durante el desarrollo de este trabajo, se identificaron los equipos críticos, se estudiaron las causas de fallo más comunes y se propusieron tareas de mantenimiento en función de la estimación de los tiempos de falla.

El seguimiento que se dio a las actividades de mantenimiento realizadas por el personal de mantenimiento desde el mes de agosto del 2017 hasta el mes de abril del 2018, permitió conocer la forma en que el área encargada de reparar los equipos realiza sus funciones, las actividades correctivas realizadas durante el periodo de cosecha 2017-2018 y las fallas identificadas en el mismo periodo.

En la fase I se elaboró un sencillo cuestionario que sirvió para identificar los equipos con mayor impacto en el proceso de beneficiado húmedo, reduciendo la cantidad de equipos inicial a cuatro que requerían mayor prioridad de acción, aun así,

ninguno de los equipos resultó estar en riesgo inmediato o extremo, sin embargo, se tomaron en cuenta dado que sus fallas repercuten de forma importante en las operaciones.

La aplicación del AMEF realizado en la fase II sirvió para identificar las principales fallas, modos, efectos y consecuencias de estas en el proceso. Se analizó la criticidad de cada modo de falla, sin embargo, se tomaron en cuenta todos los modos de fallo dado que los cuatro equipos seleccionados presentaban pocas fallas.

En la fase III se simularon los tiempos de falla mediante el uso de la distribución Weibull, se estimaron tiempos determinados para la probabilidad de que la falla ocurra y así proponer tiempos de mantenimiento preventivo. Esta medida se tomó por la ausencia de un historial de fallos, por lo que no se pudo calcular un nivel de confiabilidad, por otro lado, dio la oportunidad de estimar cuando puede ocurrir la falla, esto da la oportunidad a la organización y en específico a el área de mantenimiento de organizar las actividades preventivas sin detener el proceso.

REFERENCIAS

Badii M, Castillo J. (2009). *Distribuciones probabilísticas de uso común. International Journal of Good Conscience.* 4(1): 149-178

Barreda S. (2015). *Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (r.c.m.) en la edar de nules-vilavella.* Tesis, Ingeniería mecánica. pp 1-169

Chacón E. O. (2001*). Evaluación de los sistemas tradicional y ecológico de beneficio húmedo de café.* Tesis Agronomía, (Honduras). pp 1-31

Coss R. (2003). *Simulación un enfoque práctico*. Distrito Federal, (México). pp 1-156

Esquivel J. (2009). *Metodología para la detección y prevención de fallas en equipos industriales de producción.* Tesis Maestría en Ingeniería, UNAM. (México). pp 1-107

Ferrans O. E, Salas C. M. (2010). *Metodología para la implementación de RCM como filosofía de mantenimiento para la estación turbocompresora de gas natural Palomino.* Tesis especialización en Gerencia de Mantenimiento, Universidad Industrial, Santander. (Colombia). pp 1-178

García S. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento. Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento*. Madrid. (España). pp 1-10

Guerrero F. (2010). *Mejora del Sistema de Mantenimiento de los equipos de peaje mediante la aplicación de la Metodología RCM2.* Tesis Maestría en Ingeniería de Mantenimiento. Valencia. (España). pp 7-216

Gonzales A. M, Mora L. (2006). *Modelo Gerencial de Mantenimiento para la planta Manufacturas de Cemento S.A.* Monografía de grado Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Bucaramanga, Santander (Colombia). pp.1-103

Información propia de la empresa "*Beneficio de café Manuel Sedas Rincón" del año 2016 al 2018.*

Islam H. (2010). *Reliability-Centered Maintenance Methodology and Application:* A Case Study. Revista Scientific Research. (Egipto). (2): 863-873

Jaramillo M, Lopera C, Manotas E, Yañez S. (2008). *Generation of Weibull Bivariate Dependent Failure Times Using Copulas.* Revista Colombiana de Estadística. 31(2): 169-181

Krauss U, George A. (2002). *Un sistema de mini beneficiado húmedo para pequeños productores de café, en Perú.* Revista manejo integrado de Plagas y Agroecología. (Costa Rica). (65):65-74

Magaña A, Cuamea G. (2011). *Propuesta de una estrategia de mantenimiento utilizando Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.* Avances de Investigación en Ingeniería en el Estado de Sonora, pp. 20-24, 2011.

Martínez A. (2004). *Implementación de un Análisis de Modo y Efecto de Falla en una línea de manufactura para juguetes*. Tesis de Ciencias de la administración con Especialización en Producción y Calidad. Universidad Autónoma de Nuevo León (México). pp. 1-187

Moubray J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.* Carolina del Norte. (Estados Unidos). pp. 1-433.

Pérez B. V, Plata F. A. (2010). *Modelo del plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II de los equipos de la división de Hidrocarburos y*

exploración de minerales "H y EM" de la empresa DRUMMOND LTD. Monografía de grado. Especialidad en Gerencia de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. (Colombia). pp. 1-96

Rodríguez R. (2010). *Propuesta de procedimiento para la selección del tipo de mantenimiento a aplicar a los equipos de la Planta de Producción del Centro de Bioactivos Químicos.* Diplomada ingeniería. Universidad Marta Abreu. Santa Clara. (Cuba). pp. 1-63

Sánchez B. (2016). *Diseño de un plan de mantenimiento mediante metodología RCM para una línea de valorización de PEBD.* Tesis de especialización en ingeniera de organización industrial. pp. 1-123

Torres A. (2012). *Role of the mechanical failure during the maintenance optimization in the nuclear power plant.* Revista de Ingeniería Mecánica. La Habana (Cuba). 15(2):105-114

Villacres S. (2016). *Desarrollo de un Plan de Mantenimiento aplicando la metodología de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (rcm) para el vehículo hidrocleaner vactor m654 de la empresa etapa ep.* Tesis de maestría gestión del mantenimiento industrial. Riobamba. (Ecuador). pp. 1-80

Zapata C. (2005). *Estimation of failure rates of components in cases of lack of data or limited amounts of data.* Revista Scientia et Technica. (Colombia). 10(27): 13-18

Zegarra M. (2015). *Modern Heavy Equipment Maintenance Management*. Ciencia y Desarrollo. Universidad Alas Peruanas. 18(1):57-67

REFENCIAS ELECTRONICAS

De Marcelo, Moscoso, P. (2015). *Natura Medio Ambiental.* http://www.natura-medioambiental.com/el-cafe-una-de-las-bebidas-mas-consumidas-del-mundo/
(Consultado: 19 de enero 2017)

Sexto L. (2010). *La evaluación de tareas en un proceso de mantenimiento centrado en la confiabilidad.* http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/ Consultado: 15 enero 2018)

MONITORIZADO DE LA CONDICIÓN DEL ACEITE DE MOTORES DE AUTOMOCIÓN MEDIANTE UN KIT DE PRUEBAS RÁPIDAS

AUTOMOTIVE ENGINE OIL CONDITION MONITORING THROUGH A RAPID TEST KIT

MSc. Juan Carlos Delgado Sanabria, PhD. Simón de Jesús Fygueroa Salgado
PhD. Rafael Bolívar León

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura.
Programa de Ingeniería Mecánica.
Km 1. Vía Bucaramanga. Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Teléfono: (57+7) 5685303 Ext. 164.
E-mail: {jucadesa, sjfigueroa, rbolivarl}@unipamplona.edu.co.

Resumen: El objetivo del trabajo es evaluar la condición y contaminación del lubricante de un grupo de motores de automoción mediante el monitorizado de algunas de sus propiedades. Se utiliza un kit de pruebas rápidas desarrollado por los autores con el cual se detectan algunos síntomas del motor que varían con el tiempo y a partir de éstos, se establecen relaciones que se pueden utilizar para tomar decisiones respecto a su mantenimiento. El estudio efectuado consistió en extraer periódicamente muestras de aceite a un grupo de motores de automóvil y realizarles los ensayos que permite el kit de pruebas rápidas: mancha de aceite, crepitación, viscosidad y detección de partículas magnéticas. Para calificar los resultados de la mancha de aceite se emplea como parámetro de caracterización el índice de dispersión que de acuerdo con los resultados puede usarse como criterio para determinar el periodo de cambio de aceite. De la prueba de detección de partículas ferromagnéticas se concluye que en los motores diésel se observan a simple vista partículas de desgaste, mientras que en los motores de gasolina es necesario recurrir al uso de un microscopio para percibirlas.

Palabras clave: monitorizado, dispersión, viscosidad, partículas ferromagnéticas, crepitación.

Abstract: The objective of the work is to evaluate the lubricant condition of a group of automotive engines by monitoring some of its properties and its contamination. A rapid test kit developed by the authors is used with which some engine symptoms that vary with time are detected and from these, relationships are established that can be used to make decisions regarding its maintenance. A rapid test kit developed by the authors is used to detect some engine symptoms that vary with time and from these, relationships are established that can be used to make decisions regarding its maintenance. The study consisted of periodically extracting oil samples from a group of automobile engines and carrying out the tests that the rapid test kit allows: oil blotter, crepitation, viscosity and magnetic particle detection. To qualify the oil blotter results, the dispersion index is used as the characterization parameter, which according to the results can be used as a criterion to determine the oil change period. From the ferromagnetic particle detection test it can be concluded that in diesel engines wear particles are visible to the naked eye, while in gasoline engines it is necessary to use a microscope to perceive them.

Keywords: monitoring, dispersion, viscosity, ferromagnetic particles, crepitation.

1. INTRODUCCIÓN

En el mantenimiento predictivo de motores, una de las herramientas más importantes para predecir fallas la constituye el análisis del aceite, que suministra valiosa información utilizable como sintomatología para diagnosticar tanto el desgaste interno del motor como el estado de su lubricante (Fygueroa *et al.*, 2009). El análisis y monitorizado de los síntomas del aceite, brinda suficiente orientación sobre el estado en que se encuentra el motor con lo cual, se pueden prevenir fallas y paradas no planificadas. En el país esta técnica se encuentra poco desarrollada, debido a los pocos laboratorios que prestan sus servicios para este fin y a los altos costos fijos que representan para las empresas. Por este motivo los autores, en el Programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona, han desarrollado un equipo de pruebas rápidas (EPR) para ser utilizado en la determinación fácil y expedita de algunos síntomas característicos del estado del lubricante y el motor (Delgado *et al.*, 2016).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplea una estrategia de trabajo de campo, ya que las pruebas de seguimiento mediante la medición de los diferentes síntomas del aceite, se realizan en el propio ambiente donde se encuentran los automóviles seleccionados que serán objeto de análisis.

2.1 Equipo de pruebas rápidas

El equipo de pruebas rápidas consta de una placa de calentamiento, un viscosímetro de caída de bolas y un dispositivo de detección de partículas ferrosas. Con estos aparatos se pueden determinar algunos síntomas característicos de la condición en que se encuentran el lubricante y el motor. El ensayo de crepitación permite evidenciar la presencia de agua en el aceite (Widman, 2005), la mancha de aceite los contaminantes presentes producidos por la combustión y su detergencia/dispersividad (Abellaneda, 2008), el ensayo de viscosidad proporciona información sobre el valor de esta propiedad del aceite y la detección de partículas facilita el análisis de las partículas de desgate presentes en el aceite y determinar su origen (Clymer *et al.*, 1992).

2.2 Población de estudio

Para la realización del presente trabajo, se seleccionaron 5 vehículos de servicio público de la ciudad de Pamplona cuyas características se presentan en la Tabla 1, 3 con motor diésel y 2 con motor de gasolina. Cada vehículo se designa con la letra N seguida de un dígito del 1 al 5.

Tabla 1: Características de los vehículos seleccionados

Cod.	Marca	Motor	Tipo	Aceite
N1	Chevrolet	4HK1-TC	Diésel	Mobil Delbac 15W40
N2	Chevrolet	4JJ1-TCC	Diésel	Ursa Td 15W40
N3	Chevrolet	4JJ1-TCC	Diésel	Ursa Td 15W40
N4	Kia	DOHC-16V	Gasolina	Ursa Td 15W40
N5	Chevrolet	DOHC-16 V	Gasolina	Super 1000 25W60

2.3. Cronograma de toma de muestras

En la Tabla 2 se presenta el recorrido por ruta, día, semana y mes y el tipo de motorización: diésel o gasolina de los vehículos seleccionados.

Tabla 2. Recorrido de los vehículos

Tipo	Rutas/d.	km/ruta	km/d.	km/sem.	km/mes
Diesel	14-16	15	210-240	1470-1680	5880-6720
Gasolina	1-2	130	130-260	910-1820	3640-7280

Analizando el contenido de la Tabla 2, se observa que los kilómetros recorridos por mes son aproximadamente los recomendados por los fabricantes para realizar el cambio de lubricante. Por este motivo se establece un cronograma de toma de muestras semanal; lapso durante el cual se estima que cumplirán una cuarta parte del recorrido hasta el cambio de aceite. A las muestras tomadas durante sucesivos cambios de aceite se les asigna una letra T seguida de un número consecutivo y a las muestras semanales tomadas entre cambios, una letra S seguida de un número consecutivo.

2.4. Procedimiento de toma de muestras

Para extraer las muestras de aceite se utiliza una jeringa de succión, Figura 1(a), que permite extraer el aceite del cárter o depósito principal aún con el motor en funcionamiento. Para que la muestra sea representativa y contenga información válida se la debe tomar a través del tubo de medición del nivel de aceite, a la temperatura de operación con el motor en funcionamiento o hasta media hora después de su parada; los envases que la contienen, Figura 1(b), deben hallarse limpios y libres de humedad y se debe extraer un mínimo de 10 ml de aceite que es la cantidad recomendada para realizar las pruebas (Bilbao, 2005).

2.5. Procedimiento de ensayo con el equipo de pruebas rápidas.

A cada uno de los vehículos en estudio se le realizaron las pruebas que permite efectuar el EPR según lo describen Delgado *et al* (2016). El ensayo de la mancha de aceite se llevó a cabo durante tres meses tomando cuatro muestras por semana; las manchas obtenidas se fotografiaron digitalmente en condiciones de luz y distancia focal controladas y se caracterizaron dimensionalmente acotándolas con el software CorelDraw X3. Todas estas muestras se sometieron adicionalmente a la prueba de crepitación.
A las muestras tomadas cada cambio de aceite se les realizó la prueba de detección de partículas ferromagnéticas, se llevó un registro escrito de lo observado a simple vista en la placa y se efectuó un seguimiento fotográfico para tener un registro visual de los resultados. Al aceite limpio y a las muestras tomadas cada cambio de aceite se les efectuó la prueba de viscosidad (Sam *et al,* 2006).



Figura 1. (a) toma de la muestra; (b) muestras de un motor.

2.6. Caracterización de las manchas de aceite

La mancha de aceite que tiene la apariencia que se muestra en la Figura 2 presenta dos zonas concéntricas de forma elíptica: la interna de difusión de partículas carbonosas y la externa de difusión del aceite. La imagen fotográfica de la mancha se caracteriza dimensionalmente acotando con el software CorelDraw X3 los diámetros mayor y menor de las dos zonas de la mancha, como se observa en la figura.

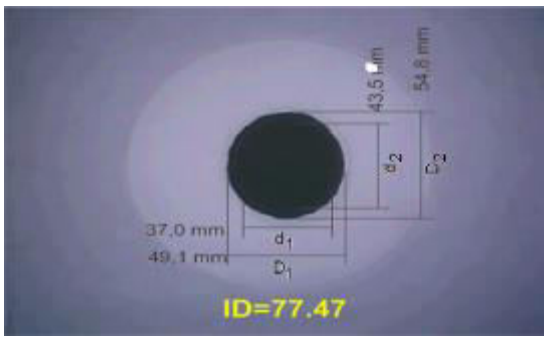


Figura 2. Mancha de aceite del motor N1 acotada

La caracterización de la detergencia/dispersividad de la mancha de aceite se hace mediante el índice de dispersión (ID) que se define mediante la expresión:

$$ID = \frac{d}{D}$$

donde $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ y $D = \frac{D_1 + D_2}{2}$

son respectivamente los diámetros medios de difusión de las partículas carbonosas y de difusión del aceite.

2.7 Equipos y software utilizados para el análisis.

Los resultados de los ensayos se obtuvieron con la ayuda de los siguientes programas y equipos: Microsoft Excel, CorelDraw X3, microscopio Bosh y viscosímetro Brielfield ED.

3. RESULTADOS

Después del monitorizado al lubricante de los motores seleccionados durante tres meses, con el EPR, se obtuvieron una serie de resultados por prueba, que se exponen y analizan a continuación y que sirven como base para conocer el estado de los motores.

3.1. De la prueba de la mancha de aceite

Las imágenes de las manchas de aceite de cada vehículo se caracterizan dimensionalmente y se grafican los ID vs el tiempo de muestreo como se muestra en la Figura 3 para una de las muestras.
Analizando la Figura 3(a) se observa que el cambio de aceite se está realizando en el intervalo de kilometraje correcto, ya que los picos más bajos de ésta corresponden a la muestra de cada cambio. Vale destacar que la dispersión disminuye paulatinamente cada semana, comportamiento normal que pone de manifiesto la pérdida de las características dispersantes del lubricante. Para los equipos con motor de gasolina se observa la misma tendencia en la Figura 3(b)
.

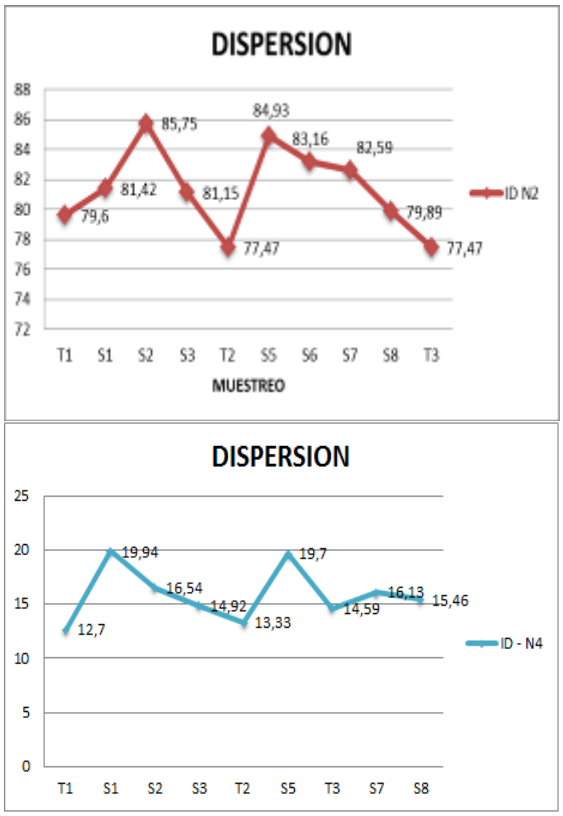


Figura 3. (a) Muestreo vs índice de dispersión motor diésel (N2), (b) Muestreo vs índice de dispersión motor de gasolina (N4).

2 De la prueba de crepitación

Los resultados de la prueba de crepitación para los vehículos con motor diesel revelan que en las muestras de las dos primeras semanas no hay presencia de agua, pero a partir de la tercera semana hasta el cambio aparecen pequeñas burbujas de entre 0.2 y 0.5 mm como se observa en la Figura 4(a), que no crecen ni crepitan por lo que se infiere que es una humedad normal en el aceite, para estos equipos en la zona que trabajan. Los resultados de la prueba realizada a los motores de gasolina, muestran desde la primera semana después de realizado el cambio de aceite, burbujas de 0.2 mm como se observa en la Figura 4(b).
Puesto que esta humedad no aumenta significativamente ni perjudica las condiciones del aceite ni del equipo, se deduce que es normal.

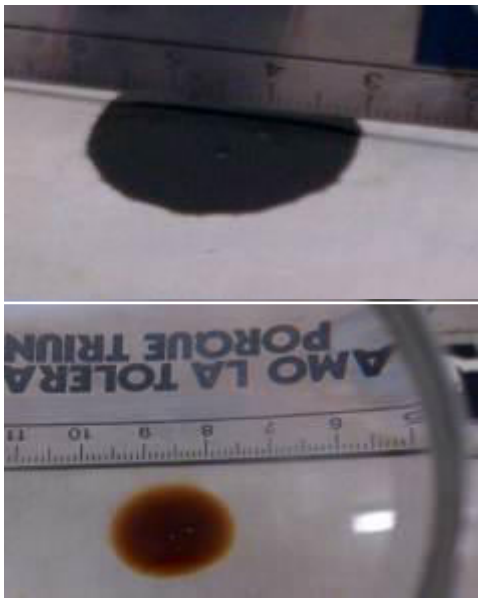


Figura 4. (a) Visualización de la prueba de crepitación para motor diesel, (b) Visualización de la prueba de crepitación para motor de gasolina.

3.3 De la prueba de partículas ferromagnéticas

La prueba de partículas ferromagnéticas se realiza a cada una de las muestras del cambio de aceite. Los resultados obtenidos, observables a simple vista o con ayuda de lupa, permiten detectar la presencia de partículas de hierro en el lubricante, ya que los metales y fibras se observan como puntos tal como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Placa obtenida con el equipo de partículas ferromagnéticas.

Del mismo modo con la ayuda del microscopio Bosh utilizando aumentos de 20X a 50X, se observan las partículas de hierro. Las imágenes obtenidas mediante esta prueba se aparecen en la Figura 6. La primera muestra del equipo N1 con el microscopio pone de manifiesto que hay algunas hojuelas, partículas de corte y pequeñas cadenas de metal como se observa en dicha figura.

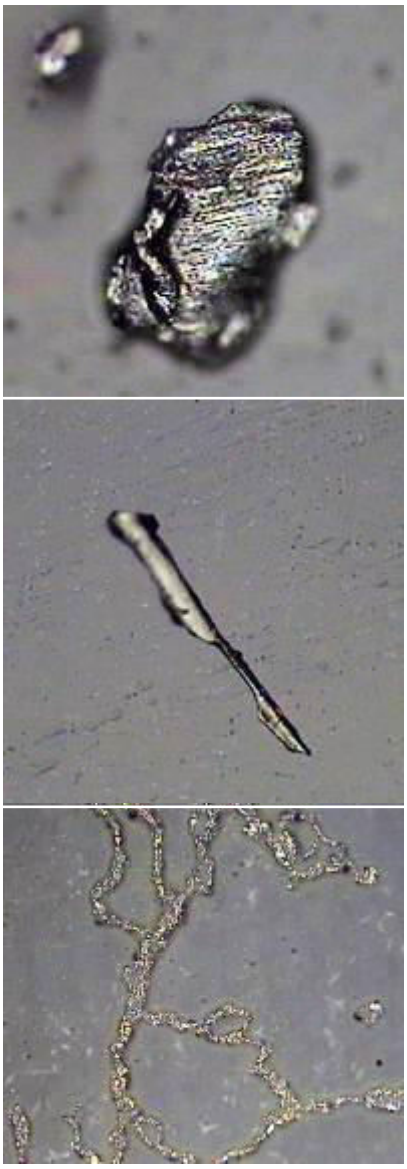


Figura 6. Partículas ferromagnéticas en el equipo N1 (muestra T1).

Las muestras del equipo N2 presentan partículas similares a las del equipo N1 tales como cadenas metálicas, fibras, materiales de corte y hojuelas como se muestra en la Figura 7.

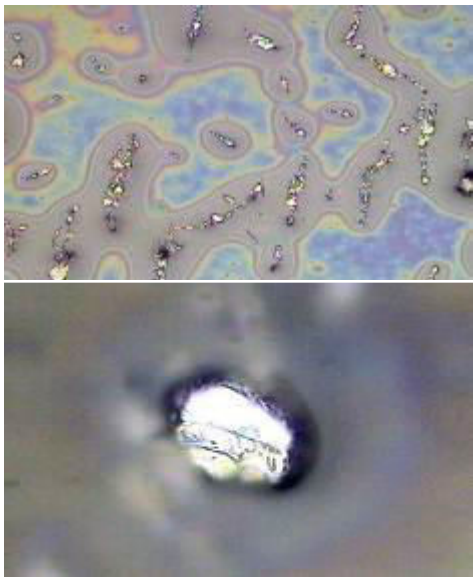


Figura 7. Partículas ferromagnéticas en el equipo N2 (muestra T1).

Los resultados de las pruebas realizadas al vehículo N3 por el contrario, muestran baja cantidad de hojuelas, cadenas metálicas y fibras como se puede apreciar en la Figura 8.
Para los vehículos N4 y N5 (con motor de gasolina) utilizando el mismo procedimiento con el que se probaron los equipos diesel no se obtuvo ningún tipo de partículas.

3.4 Del ensayo de viscosidad

Este ensayo se realiza a cada una de las muestras del cambio de aceite para comparar su viscosidad con la del aceite limpio y determinar si aumentó o disminuyó.
Como se observa en la Tabla 3 en el equipo N1 la viscosidad cinemática aumenta un 8,5 %; aumento que se mantiene de cambio a cambio.
Como se deduce de las Tablas 4 y 5 en los equipos N2 y N3 la viscosidad cinemática aumenta un 8,1 % y este aumento se mantiene de cambio a cambio
En estos equipos se obtienen los mismos resultados debido a que poseen las mismas características de modelo, año, recorrido de trabajo y utilizan aceite de la misma marca y tipo.

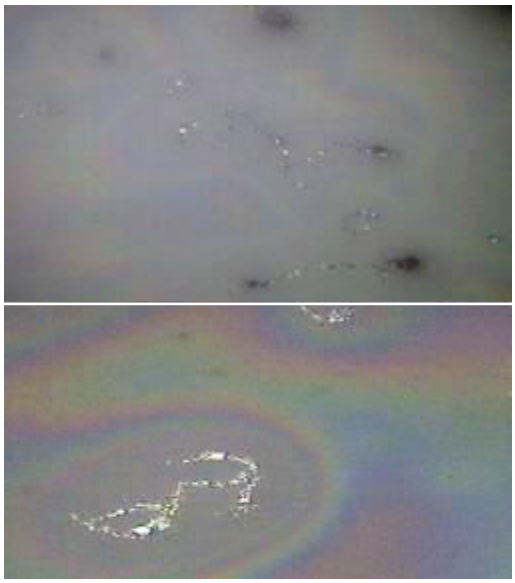


Figura 8. Partículas ferromagnéticas en el equipo N3 (muestra T1).

Tabla 3. Resultados de viscosidad del equipo N1 obtenidos con el viscosímetro de caída de bola.

Ensayo	Temperatura [°C]	Distancia [mm]	Tiempo [s]	Visc. Cinemática [cSt]
Limpio	22,7	17,7	0,39	255,10
1	22,7	17,7	0,40	276,67
2	22,7	17,7	0,40	276,67
3	22,7	17,7	0,40	276,67

Tabla 4. Resultados de viscosidad del equipo N2 obtenidos con el viscosímetro de caída de bola.

Ensayo	Temperatura [°C]	Distancia [mm]	Tiempo [s]	Visc. Dinámica [Pa.s]	Visc. Cinemática [cSt]
Limpio	23	18,2	0,40 s	23,9	262,35
1	23	18,2	0,41 s	24,9	283,58
2	23	18,2	0,41 s	24,9	283,58
3	23	18,2	0,41 s	24,9	283,58

Tabla 5. Resultados de viscosidad del equipo N3 obtenidos con el viscosímetro de caída de bolas.

Ensayo	Temperatura [°C]	Distancia [mm]	Tiempo [s]	Visc. Dinámica [Pa.s]	Visc. Cinemática [cSt]
Limpio	23	18,2	0,45	2,39	262,35
1	23	18,2	0,41	2,49	283,58
2	23	18,2	0,41	2,49	283,58
3	23	18,2	0,41	2,49	283,58

Como se observa en la Tabla 6, en el equipo N4 la viscosidad cinemática disminuye un 4,6 %, pérdida que se mantiene de cambio a cambio.

Como se puede apreciar en la Tabla 7, en el equipo N5 la viscosidad cinemática disminuye un 6,7 % y esta pérdida se mantiene de cambio a cambio.

Tabla 6. Resultados de viscosidad del equipo N4 obtenidos con el viscosímetro de caída de bolas

Ensayo	Temperatura [°C]	Distancia [mm]	Tiempo [s]	Visc. Dinámica [Pa.s]	Visc. Cinemática [cSt]
Limpio	21,5	18,2	0,41	24,3	290,10
1	21,5	18,2	0,41	24,9	276,76
2	21,5	18,2	0,41	24,9	276,76
3	21,5	18,2	0,41	24,9	276,76

Tabla 7.Resultados de viscosidad del equipo N5 obtenidos con el viscosímetro de caída de bolas

Ensayo	Temperatura [°C]	Distancia [mm]	Tiempo [s]	Visc. Dinámica [Pa.s]	Visc. Cinemática [cSt]
Limpio	23	12	0,60	56,25	639,17
1	23	12	0,59	55,30	596,35
2	23	12	0,59	55,30	596,35
3	23	12	0,59	55,30	596,35

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se analizan por separado los resultados de las ensayos realizados empleando el EPR en desarrollo.

4.1 De la mancha de aceite

En las Figuras 9(a) y 9(b) se comparan los resultados obtenidos para el indicé de dispersión tanto de motores diesel como de gasolina.
Como se puede apreciar en la Figura 9(a) para los vehículos con motor diesel en las muestras correspondientes a los cambios de aceite el índice de dispersión se mantuvo entre 74 % y 78 %. En consecuencia se puede tomar el promedio de estos valores como nivel de alerta para el cambio oportuno del lubricante para las flotas de automovilesen servicio en las mismas condiciones de trabajo.

Con respecto a la Figura 9(b) se puede apreciar que la diferencia de marcas, modelos y lugar de trabajo no intervienen en la dispersión, ya que esta se mantiene en un rango de 10 a 15%.En consecuencia se puede tomar el promedio de estos valores como nivel de alerta, para el cambio oportuno del lubricante en las mismas condiciones de trabajo.

4.2 Crepitación

Las pruebas realizadas con esta técnica se comparan en la Figura 4 que muestra la aparición de pequeñas burbujas de agua que no crepitan. En cuanto a los equipos diesel dicho contenido es evidente después de la tercera semana, cuando aparecen burbujas de 0.2 a 0.5 mm lo que indica que el contenido de agua: de 500 a 1000 ppm se produce por la condensación de humedad del ambiente de trabajo. Con respecto a los motores de

gasolina es notable la presencia de burbujas con un

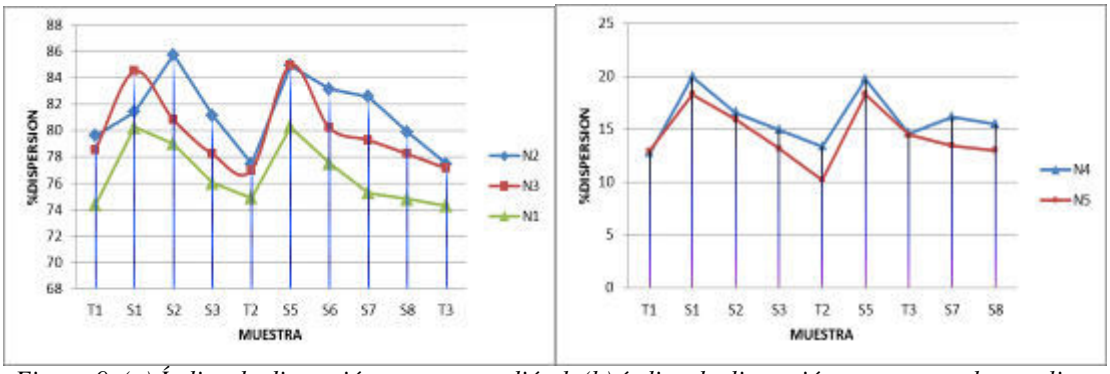


Figura 9. (a) Índice de dispersión en motores diésel, (b) índice de dispersión en motores de gasolina.

diámetro máximo de 0.5 mm, desde la primera semana de realizado el cambio. Este tamaño indica que estos equipos contienen entre 0.05 - 0.1 % de agua originada por la condensación debida al cambio de clima, ya que éstos trabajan en rutas intermunicipales.

Tabla 8. Comparación de las partículas obtenidas para el vehículo N1 por el EPR y por Moreno (2008)

Comparación de partículas ferromagnéticas			
Código	Obtenidas por el EPR	Obtenidas por Moreno (2008)	Observación
N1-T1			Para este vehículo las partículas se deben principalmente al desgaste generado por fenómenos de adhesión y abrasión, a velocidades y cargas excesivas o a una falla en la lubricación del elemento.
N1-T1			Al comparar estas dos fotografias.se concluye que las partículas observadas se deben al desgaste normal por contacto entre metales

N1-T1			De esta comparación se llega a la conclusión que las partículas son de corte producidas por abrasión entre metales, lo que indica fallas importantes de trabajo de la máquina

Fuente (autor)

4.3 Contenido de partículas ferromagnéticas

Los resultados de la detección de partículas ferromagnéticas permiten determinar su presencia, forma y tamaño en el lubricante de motores diesel pero no permiten evaluar de manera visible un aumento o disminución del número de partículas en la muestra, por lo tanto, se considera que esta prueba produce como resultado: contiene o no contiene partículas ferromagnéticas.

A partir de las muestras obtenidas con el microscopio Bosh se realiza un estudio comparado de la forma de las partículas presentes en las muestras tomadas con el EPR y las obtenidas por Moreno (2008) con aumentos semejantes. En la Tabla 8 se muestra dicha comparación para el vehículo N1.

El equipo N2 presenta partículas similares a las del equipo N1 y en cantidad semejante de lo que se concluye, que su desgaste es producido por los mismos mecanismos. En relación con el equipo N3 se observa que presenta partículas similares a las del equipo N1 pero en menor cantidad de lo que se deduce que el equipo tiene un desgaste normal y está en mejores condiciones en comparación de los otros equipos diesel. Respecto a los equipos N4 y N5 de gasolina, no se observan partículas de desgaste debido a que estos motores son limpios, están en muy buenas condiciones y realizan su cambio de lubricante en el kilometraje recomendado por el fabricante.

4.4. Viscosímetro de caída de bolas

Los equipos con motor diesel presentan un aumento promedio de la viscosidad de 8.5 %. Este aumento, no sobrepasa el nivel de alarma que corresponde al 40%, lo que indica que no hay contaminación alarmante del lubricante que debe estar cumpliendo sus funciones detergentes/ dispersantes, recogiendo los residuos generados por la combustión.

Los equipos con motor de gasolina presentan una disminución promedio de la viscosidad de 6%, que no sobrepasa el nivel de alarma que corresponde al 15%, lo que indica que no hay dilución por combustible o que se haya añadido aceite con menor viscosidad.

5. CONCLUSIONES

- La prueba de la mancha de aceite se puede caracterizar con el porcentaje de dispersión que de acuerdo con los resultados obtenidos puede servir como criterio para determinar el periodo de cambio de aceite.
- La prueba de crepitación se constituye en un ensayo sencillo y con una escala de cuantificación de la humedad de fácil observación.
- La viscosidad del lubricante de los equipos diesel aumenta con el uso mientras que la de los equipos de gasolina disminuye con el uso.
- Si en el ensayo de partículas ferromagnéticas se emplea un microscopio que no hace parte del equipo, se obtiene información detallada del tipo de desgaste presente.

REFERENCIAS

Fygueroa S., S. J., Serrano R., J. C. y Moreno C., G. G. (2009). "Mantenimiento predictivo de motores mediante análisis de aceite". Revista colombiana de tecnologías de avanzadas. **Vol. 1**, No. 13

Delgado S., J. C., Fygueroa S., S, J. y Sierra, S. E. (2016). "Diseño de un equipo de pruebas rápidas para aceites usados". INGE CUC. **Vol. 12**, no. 1,

Bilbao, M. (2005). Ensayo de la mancha, Wearcheck ibérica. http://clientes.lubrication-management.com/Documentacion/DocTecnica/Mancha.asp, (Consultado: 23 mayo 2017)

Sam, G., Santhosh, B., Vishaal, G. y Mridul, G. (2006) "Effect of soot on lubricant oil viscosity". Tribology International. No. 40.

Moreno, L. (2008). "*Contribución al desarrollo y mejora de técnicas para la detección y análisis de partículas metálicas contaminantes en aceites lubricantes usados*". Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Widman, R. (2005). "La contaminación del aceite por agua y su detección en campo". Widman International SRL. http://docplayer.es/4600575-La-contaminacion-del-aceite-por-agua-y-su-deteccion-en-campo-por-richard-widman.html, (Consultado 6 de octubre de 2017)

Abellaneda, G. y Pigeon, D. (2011). "Lubricating Oils Evaluation of Dispersancy Capacity of Lubricating Oils and the Impact of Biofuels on Lubricant Dispersancy". Journal of ASTM International, **Vol.** 8, No. 7.