

## NOTA DEL EDITOR

### REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA

ISSN: 1692-7257

Depósito Legal No.: S1537

La revista de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura tiene como propósito la difusión de conocimientos en las áreas de las tecnologías de avanzada, esta es una nueva versión de la revista científica Chíchira (ISSN 0122-9966) que anteriormente publicaba nuestra antigua facultad.

Esta revista es un punto de encuentro entre los universitarios, ingenieros e investigadores tanto de la Facultad como de otras Universidades del País y el extranjero, que tienen lazos de trabajos con la *Universidad de Pamplona*, se les brinda la posibilidad de que se publiquen sus resultados investigativos.

La revista propone artículos generales y artículos especializados donde se tratan temas desde Control Automático, Automatización, Procesamiento Digital de Señales, Electrónica, Eléctrica, Telecomunicaciones, Sistemas y áreas a fines a la ingeniería. La revista tiene circulación semestral con cobertura nacional e internacional.

Se cumple con esta publicación seriada uno de los propósitos de nuestra universidad, el de dar a conocer y propiciar el intercambio de las nuevas tecnologías a toda la comunidad universitaria e industrial.

*La revista COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA no se hace responsable por el contenido de los artículos publicados.*

## EDITOR'S NOTE

### COLOMBIAN MAGAZINE OF ADVANCE TECHNOLOGIES

ISSN: 1692-7257

Legal Deposit No.: S1537

The Engineering and Architecture Faculty magazine has as main goal the knowledge diffusion in advanced technologies areas; this is a new version of the scientific magazine Chíchira (ISSN 0122-9966) that was previously published.

This magazine is a point of contact between the college students, engineers and reseachers as much from our Faculty, other foreigner Universities or of all the Country, which have works bows with the *University of Pamplona*. With this magazine all have the oportunity to publish their researching results.

The magazine proposes general and specialized papers and discusses topics such as Automatic Control, Automation, Digital Signal Processing, Electronics, Energy, Telecommunications, Systems and several areas related to engineering. The magazine has semester circulation with national and international covering.

With this publication is fullfilled one of the main goals of our university, to broadcast knowleage and to facilitate the new technologies interchange between all universities and the industrial community.

*The COLOMBIAN MAGAZINE OF ADVANCE TECHNOLOGIES is not responsible for the content of papers published.*

# CONTENIDO

	Pág
<b>SUPPORT VECTOR MACHINE FOR DETECTING TEXTILE DEFECTS USING SPATIAL FEATURES OF THE TEXTURE</b> <i>MAQUINA DE VECTORES DE SOPORTE PARA DETECCION DE DEFECTOS TEXTILES EMPLEANDO CARACTERISTICAS ESPACIALES DE TEXTURA</i> Ing. Duber Martínez Torres, Ing. Sergio Orjuela.....	1
<b>XSPDDL: A XML BASED LANGUAGE FOR WEB ORIENTED DEFINITION OF PLANNING DOMAINS</b> <i>XSPDDL: UN LENGUAJE BASADO EN XML PARA LA DEFINICION DE DOMINIOS DE PLANIFICACION ORIENTADOS A LA WEB</i> MSc. Jaime Alberto Guzmán Luna, Ing. Daniel Alonso Areiza Zabala, MSc. Ailín Orjuela Duarte.....	9
<b>ACTIVE POWER FILTER IN PARALLEL: ANALYSIS AND DESING</b> <i>FILTRO ACTIVO DE POTENCIA EN PARALELO: ANALISIS Y DISEÑO</i> MSc. Pedro Fabian Cárdenas, MSc. Fabian Jimenez, MSc. César Augusto Peña Cortes.....	17
<b>THE TMR-1. A TELEOPERATED MOBILE ROBOT</b> <i>El TMR-1. UN ROBOT MOVIL TELEOPERADO</i> Ing. Melvin Andrés González Pino, PhD. Cristhian Manuel Durán Acevedo.....	26
<b>MATHEMATICAL MODELING OF THE SCHEDULING ASSIGNMENT PROBLEM FOR BUSINESSES OF VARYING DEMAND</b> <i>MODELAMIENTO MATEMATICO DEL PROBLEMA DE ASIGNACION DE HORARIOS PARA EMPRESAS DE DEMANDA VARIABLE</i> Ing. Natalia Bohórquez Bedoya, Ing. David Álvarez Martínez, MSc. Eliana Mirledy Toro Ocampo.....	34
<b>SELECTION OF THE INSTRUMENTATION AND PROCESS VARIABLES OF A BIODIGESTION SYSTEM IN SEPARATE PHASES (ACIDOGENESIS AND METHANOGENESIS)</b> <i>SELECCION DE LA INSTRUMENTACION Y VARIABLES DE PROCESO DE UN SISTEMA DE BIODIGESTION EN FASES SEPARADAS (ACIDOGENESIS Y METANOGENESIS)</i> PhD. Jacipt Alexander Ramón V., Ing. Erika Yesenia Carrillo Sánchez, PhD. Mario Javier Vargas.....	42
<b>STUDY OF RAIL VEHICLE DYNAMICS IN CURVED TRACKS. PART I: WHEEL-RAIL CONTACT ANALYSIS</b> <i>ESTUDIO DE LA DINAMICA DE VEHICULOS FERROVIARIOS EN TRAMOS CURVOS. PARTE I: ANALISIS DEL CONTACTO RUEDA-CARRIL</i> PhD(c). Jesús Otero Yugat.....	48
<b>STUDY OF RAIL VEHICLE DYNAMICS IN CURVED TRACKS. PART II: TRANSVERSE STABILITY OF THE COACH</b> <i>ESTUDIO DE LA DINAMICA DE VEHICULOS FERROVIARIOS EN TRAMOS CURVOS. PARTE II: ESTABILIDAD TRANSVERSAL DEL VAGON</i> PhD(c). Jesús Otero Yugat.....	54
<b>CENTRIFUGAL COMPRESSOR INSTRUMENTATION ENGINEERING</b> <i>INGENIERIA DE INSTRUMENTACION DEL COMPRESOR CENTRIFUGO</i> MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ing. Durwin Alexis Roza Ibáñez, PhD. Aldo Pardo García.....	61
<b>FUZZY SYSTEM TO EVALUATE WORK FOR GRADUATION</b> <i>SISTEMA DIFUSO PARA LA EVALUACION DE TRABAJOS DE GRADO</i> MSc. Luz Marina Santos Jaimes, Ing. Edgar Andrei Pérez.....	69

<b>IMPLEMENTING THE ONTOSMD METHOD IN DESIGN OF A CONCEPTUAL MODEL FOR THE CONSTRUCTION OF A KNOWLEDGE BASE OF THE SUPPORT SERVICE IN INFORMATION TECHNOLOGY</b> <i>APLICACION DEL METODO ONTOSMD EN EL DISEÑO DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA CONSTRUCCION DE UNA BASE DE CONOCIMIENTO DEL SERVICIO DE SOPORTE EN TECNOLOGIA DE INFORMACION</i> MSc. Mauricio Rojas Contreras, Esp. Maritza del Pilar Sánchez Delgado.....	76
<b>DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BARRIER EVADER AUTONOMOUS VEHICLE USING NEURAL NETWORKS IN A DIGITAL SIGNAL PROCESSOR DSP56F801</b> <i>DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN VEHICULO AUTONOMO EVASOR DE OBSTACULOS EMPLEANDO REDES NEURONALES EN UN PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES DSP56F801</i> PhD. Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero, Ing. Carlos Alberto Gamarra Sierra.....	83
<b>MATHEMATICAL MODELING OF THE PROBLEM OF SECONDARY DISTRIBUTION SYSTEM PLANNING</b> <i>MODELAMIENTO MATEMATICO DEL PROBLEMA DEL PLANEAMIENTO DE SISTEMAS SECUNDARIOS DE DISTRIBUCION</i> Ing. Julián D. González Hoyos, PhD. Ramón A. Gallego Rendón, MSc. Ricardo A. Hincapié Isaza.....	89
<b>PROPOSAL TO USE ADAPTIVE CONTROL IN WATER CHILLERS FOR USE IN VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEMS</b> <i>PROPUESTA DE USO DE CONTROL ADAPTATIVO EN ENFRIADORES DE AGUA PARA USAR EN SISTEMAS DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR</i> PhD. Francisco E. Moreno Garcia, PhD. Enio P. Bandarra Filho, PhD. Oscar S. Hernandez Mendoza.....	96
<b>QUANTIFICATION OF CARDIAC FUNCTION FROM ANGIOGRAPHIC IMAGES</b> <i>CUANTIFICACION DE LA FUNCION CARDIACA A PARTIR DE IMAGENES ANGIOGRAFICAS</i> MSc. Hernando Velandia, PhD. Rubén Medina Molina.....	102
<b>FLOWS AND STABILITY ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH SIMULINK</b> <i>ANALISIS DE FLUJOS Y ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA EN SIMULINK</i> MSc. Abel E. Quezada C., MSc. Jorge A. Pérez V., MSc. Oscar Núñez O., MSc. David García Ch.....	108
<b>STUDY AND CLASSIFICATION OF CHAGASIC PATIENTS USING MULTIVARIATE STATISTICAL TECHNIQUES</b> <i>ESTUDIO Y CLASIFICACION DE PACIENTES CHAGASICOS UTILIZANDO TECNICAS ESTADISTICAS MULTIVARIANTES</i> MSc. Luis Enrique Mendoza, PhD. Delfina M. Padilla.....	114
<b>RELIABILITY EVALUATION WITH A MARKOV CHAIN MODEL OF A GROUP OF 3 PUMPS</b> <i>EVALUACION DE CONFIABILIDAD CON UN MODELO DE CADEMAS DE MARKOV DE UN GRUPO DE 3 BOMBAS</i> Ing. Carolina Casanova, PhD. Cesar Contreras.....	119
<b>“FLOW” A TOOL FOR ANALYSIS OF POWER FLOW AND FACTS DEVICES</b> <i>“FLUJOS” UNA HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DE FLUJO DE POTENCIA Y DISPOSITIVOS FACTS</i> MSc. Oscar Núñez Ortega, MSc. Abel E. Quezada Carreón Chaparro, Ing. Efraín Herrera Rodríguez.....	124
<b>POSITION SYSTEM CONTROL FOR A PLANE SURFACE BASED ON FUZZY LOGIC AND ASSEMBLER LANGUAGE</b> <i>SISTEMA DE CONTROL DE POSICION PARA UNA SUPERFICIE PLANA BASADO EN LOGICA DIFUSA Y LENGUAJE ENSAMBLADOR</i> MSc. Wilson Javier Pérez Holguín, Ing. María Luisa Pinto Salamanca.....	131
<b>FUZZY IDENTIFICATION AND PARALLEL DISTRIBUTED COMPENSATION FOR CRUISE FLIGHT PHASE OF A BLIMP</b> <i>IDENTIFICACION DIFUSA Y COMPENSACION PARALLELA DISTRIBUIDA PARA FASE DE VUELO CRUCERO DE UN DIRIGIBLE</i> Ing. Erik Díaz, PhD. Leonardo E. Solaque Guzmán, PhD. Alain Gauthier Sellier.....	136

Recibido: 13 de marzo de 2009  
Aceptado: 02 de junio de 2009**SUPPORT VECTOR MACHINE FOR DETECTING TEXTILE DEFECTS USING  
SPATIAL FEATURES OF THE TEXTURE****MAQUINA DE VECTORES DE SOPORTE PARA DETECCION DE DEFECTOS  
TEXTILES EMPLEANDO CARACTERISTICAS ESPACIALES DE TEXTURA****Ing. Duber Martínez Torres, Ing. Sergio Orjuela****Universidad Antonio Nariño, Colombia**  
Ciudad Universitaria Torobajo. Calle 18, Carrera 50, Tel. 27311449.  
E-mail: duber01@yahoo.com, seraleov@telin.ugent.be

**Abstract:** This paper presents the obtained results using a classifier with Support Vector Machines for detecting textile defects in fabrics. In order to obtain the necessary texture features for the detection, four different texture analysis methods were used. The results show the validity of the implemented scheme for detection of the five of the most common defects types.

**Resumen:** En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al emplear un clasificador con Máquinas de Vectores de Soporte para la detección de defectos en telas sin estampar. Se utilizan cuatro técnicas espaciales para análisis de textura que junto a un grupo de descriptores estadísticos permiten conformar las características necesarias para la detección. Los resultados muestran la validez del esquema implementado para la detección de cinco de los tipos más frecuentes de defectos.

**Keywords:** Image Processing, Image object recognition, Pattern recognition.

**1. INTRODUCCION**

Dentro del proceso textil, una primera etapa es la producción de telares en crudo, que corresponde a telas sin ningún tipo de estampado y es en este punto donde se deben detectar los diferentes tipos de defectos en el tejido. En países como Colombia, muchas de estas tareas de inspección y control de calidad son realizadas por operarios, lo cual conlleva a la inexactitud en los resultados obtenidos por factores como: la velocidad con que pasa la tela bajo revisión, la amplia área que debe ser abarcada, el cansancio físico y agotamiento visual que esta actividad implica, entre otros. Para el trabajo, se emplearon muestras textiles suministradas por empresas textiles del departamento del Tolima-Colombia, dentro de ellas, se seleccionaron los principales defectos que

se presentan durante el proceso de fabricación. Algunos de estos defectos son apenas perceptibles a simple vista, lo que los hace difíciles de detectar. Dada la naturaleza de la superficie de los tejidos, los defectos aparecen como una variación de la textura, razón principal por la cual las técnicas de análisis de textura han sido ampliamente empleadas para este tipo de aplicaciones (Habit et al., 2004), (Pérez et al., 2007). Existen diversos enfoques para la extracción de las propiedades de textura: espaciales, espectrales, estructurales, basadas en modelo, basadas en color. (Kulak, 2002), (Ralló et al., 2003).

En este trabajo se explora si algunas de las técnicas *espaciales* más comúnmente empleadas, junto con un clasificador apropiado permiten detectar los defectos presentes en las muestras adquiridas. Se

hizo la selección de las técnicas *espaciales* dado que presentan las condiciones de velocidad y complejidad apropiadas para su implementación en un sistema de tiempo real.

En trabajos previos han empleado clasificadores principalmente basados en Redes Neuronales Artificiales (Islam et al., 2006). En este trabajo se emplea como clasificador una Máquinas de Vectores de Soporte SVM (por sus siglas en inglés Support Vector Machines), que en los últimos años, han mostrado ser una herramienta muy poderosa en la clasificación (Kwang et al., 2002). Se parte de una descripción de las imágenes adquiridas y la plataforma de captura empleada, seguidamente se realiza una explicación de las diferentes técnicas espaciales de análisis de textura implementadas para la extracción de las características así como del clasificador con SVM. En la última sección se indican los resultados obtenidos de acuerdo con los diferentes tipos de defectos y las distintas técnicas implementadas.

## 2. DESCRIPCION DEL BANCO DE PRUEBAS

### 2.1 Imágenes de Prueba

Las imágenes que conforman el banco de pruebas para la detección de defectos, fueron adquiridas a partir de muestras de tejido representativas de la industria textil de la región. Fueron considerados cinco tipos de defectos: defectos de barrado, defectos por manchas, defecto de mota tejida, defecto de mariposeo y defecto por piques. La Fig. 1. corresponde a imágenes de los respectivos defectos en el orden anteriormente expuesto.

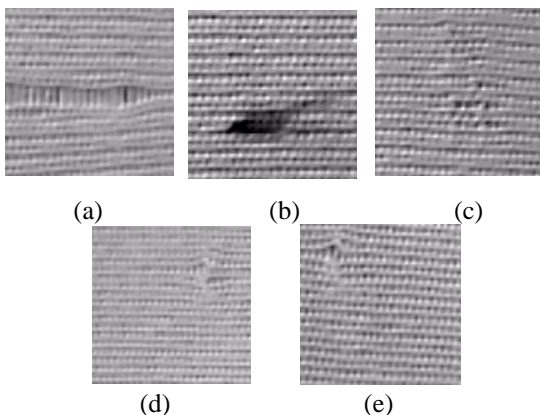


Fig. 1. Tipos de defectos. (a) defecto de barrado, (b) defecto de mancha, (c) defecto de mota tejida, (d) defecto de mariposeo y (e) defecto por piques

### 2.2 Plataforma de Captura

Las muestras obtenidas corresponden a tejidos sin estampar tipo tubular como se indica en la Fig 2. Para la captura se implementó la plataforma que se muestra en la Fig. 3. que permita emular algunas de las condiciones de la máquina tejedora.



Fig. 2. Tejido Tubular

Fig. 3. Plataforma

Las imágenes se capturaron con una resolución de 640x480 y durante el preprocesamiento fueron divididas en cuadrículas de 100x100 sobre las cuales se busca la detección de los defectos.

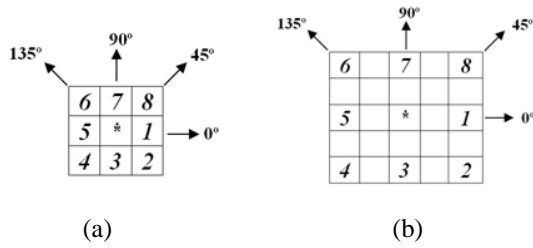
Para el entrenamiento del clasificador se emplearon un total de 500 imágenes, 100 por cada tipo de defecto y para la validación se emplearon 1000 imágenes, 200 por cada tipo de defecto.

## 3. TÉCNICAS DE ANALISIS DE TEXTURA IMPLEMENTADAS

En un sentido general, la textura hace referencia a las características y apariencia de la superficie de un cierto objeto, de acuerdo con el tamaño, forma, densidad, arreglo y proporción de los elementos estructurales que la constituyen. Se cuenta con diferentes enfoques para extraer la información a partir de la textura de la imagen (Turcercyan y Jain, 1993). En este trabajo se explora uno de estos enfoques, basado en las propiedades espaciales de la imagen y la distribución espacial de las variaciones de tono dentro de un grupo de píxeles de resolución. Se exploran cuatro técnicas espaciales para la extracción de características, a partir de la textura. A continuación se realiza una breve descripción de cada una.

### 3.1 Matriz de Concurrencia de Niveles de Gris

La matriz GLCM por sus siglas en inglés (*Grey Level Co-occurrence Matrix*) es conformada como un histograma de dos dimensiones, donde se indica la frecuencia en que aparece una cierta relación entre pares de píxeles para una distancia y orientación dada. Se establecen típicamente 4 orientaciones  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  para distancias de 1, 2, etc. píxeles de separación.

Fig. 4. Píxeles vecinos. (a)  $d=1$ , (b)  $d=2$ 

En la imagen de la Fig. 4 (a), se indican los píxeles vecinos tomando como referencia una distancia  $d=1$ . Para una orientación de  $0^\circ$  los píxeles a considerar son los de la posición 1 y 5. Para la orientación de  $45^\circ$  los píxeles 4 y 8. En la Fig. 4 (b) se toma como referencia una distancia  $d=2$ , con los píxeles 1, 5 y 8 para las orientaciones  $0^\circ$  y  $45^\circ$  respectivamente.

Es posible conformar una matriz de GLCM para cada combinación distancia-orientación. Dicha matriz se conforma de la siguiente manera: La imagen original se cuantifica para un total de  $N_g$  niveles de gris. Se genera una matriz de  $N_g$  filas y  $N_g$  columnas. Cada celda indica el número de veces que una determinada pareja de niveles de gris se repite al recorrer la imagen cuantificada, en la orientación y distancia determinada.

$N_g$	$N_g$	1	2	...	$m$	...	$N_g$
1				...		...	
2				...		...	
...				...		...	
$k$				...	200	...	
...				...		...	
$N_g$				...		...	

$d = 1, \theta = 45^\circ$

Fig. 5. Matriz GLCM

En la Fig. 5. se indica la matriz GLCM para una orientación de  $0^\circ$  y distancia  $d=1$ . La celda correspondiente a la fila  $k$ , columna  $m$ , indica que al recorrer la imagen cuantificada, las veces que se encuentra que el vecino del un píxel con nivel de gris  $k$ , para una distancia de 1 píxel con una orientación de  $45^\circ$  tiene un nivel de gris  $m$ , se repite 200 veces.

Con la finalidad de hacer invariable la matriz GLCM respecto al tamaño de la imagen, es necesario normalizarla, para ello primero se vuelve simétrica sumándole su transpuesta, y seguidamente expresándola como una función de

probabilidad, donde a cada celda se le asigna el valor indicado por la ecuación (1), que corresponde a la relación de aparición de un evento entre el número total de posibles eventos.

$$c_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{ij}} \quad (1)$$

### 3.1.1 Descriptores de textura empleados

Una vez obtenida la matriz GLCM, se conforma un vector de características cuyos 11 elementos corresponden a los descriptores indicados a continuación (Jiménez, 2002):

Sean:

$c_{ij}$  Término  $i,j$  de la matriz GLCM

$N_g$  Número de niveles de gris

$$\sum_i y \sum_j = \sum_{i=1}^{N_g} y \sum_{j=1}^{N_g}$$

$$\text{Entropía } Ent = - \sum_i \sum_j c_{ij} \log c_{ij} \quad (2)$$

$$\text{Uniformidad } U = \sum_i \sum_j c_{ij}^2 \quad (3)$$

$$\text{Contraste } Con = \sum_i \sum_j |i - j|^2 c_{ij} \quad (4)$$

$$\text{Correlación } Crr = \frac{1}{s_i s_j} \left| \sum_i \sum_j (i - m_i)(j - m_j) c_{ij} \right| \quad (5)$$

Donde

$$m_i = \sum_j i c_{ij} \quad m_j = \sum_i j c_{ij}$$

$$s_i = \sum_j (i - m_i) c_{ij}$$

$$s_j = \sum_i (j - m_j) c_{ij}$$

**Momento de Diferencia de Orden  $k$ :**

$$Dif = \sum_i \sum_j |i - j|^k c_{ij} \quad (6)$$

**Momento Inverso de Diferencia de Orden  $k$ :**

$$Inv = \sum_i \sum_j \frac{c_{ij}}{|i - j|^k} ; i \neq j \quad (7)$$



$$\text{Máxima Probabilidad } mp = \max_{ij}(c_{ij}) \quad (8)$$

**Homogeneidad Local:**

$$HL = \sum_i \sum_j \frac{c_{ij}}{1 + (i - j)^2} \quad (9)$$

$$\text{Varianza } V = \sum_i \sum_j (i - m)^2 c_{ij} \quad (10)$$

$$\text{Directividad } Dir = \sum_i c_{ii} \quad (11)$$

**Tendencia de Cluster:**

$$TC = \sum_i \sum_j (i + j - 2m)^k c_{ij} \quad (12)$$

### 3.2 Matriz de Secuencia de Longitud de Nivel de Gris GLRLM (Gray Level Run Length Matrix)

Por lo general un número grande de píxeles vecinos del mismo nivel de gris representan una textura rustica, mientras que un reducido número de estos píxeles representa una textura refinada, de tal forma que la longitud de primitivos de textura en diferentes direcciones puede servir como descriptor de textura, donde un primitivo es el máximo conjunto contiguo de píxeles de nivel de gris constantes ubicados en una línea. El método de longitud de secuencias de gris está basado en calcular el número de secuencias de nivel de gris de varias longitudes, donde una secuencia de nivel de gris es un conjunto de puntos de la imagen linealmente adyacentes en una secuencia en una determinada orientación. En la Fig. 6, las dos celdas sombreadas indican una secuencia de longitud 2 en la orientación de 45°.

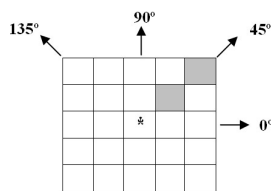


Fig. 6. Secuencia de longitud 2

Long	1	2	...	m	...	L <sub>M</sub>
Nivel						
1		...		...		
2		...		...		
...		...		...		
k		...	10	...		
...		...		...		
N <sub>G</sub>		...		...		

Fig. 7. Matriz GLRLM

Una vez la imagen se ha cuantificado en L<sub>G</sub> niveles de gris, se genera la matriz GLRLM con L<sub>G</sub> filas y L<sub>M</sub> columnas, donde L<sub>M</sub> corresponde a la máxima longitud de la secuencia. Por cada posible orientación (0°, 45°, 90° y 135°) se genera una matriz GLRLM. En la Fig. 7, se indica la conformación de la matriz para una orientación de 0°. El valor 10 que aparece en la celda sombreada indica que para el nivel de gris **k**, se encontraron 10 secuencias de longitud **m** de píxeles consecutivos con el mismo valor **k** en una orientación de 0°.

#### 3.2.1 Descriptores de Textura empleados

Sea  $B(a, r)$  el número de primitivos de la longitud  $r$  y el nivel de gris  $a$ , en alguna dirección  $f$ ;  $M$ ,  $N$  las dimensiones de la imagen, y  $L$  el número de niveles de gris de la imagen. Sea  $L_m$  la longitud de primitivo máxima en la imagen.

El número total de secuencias  $K$  se obtiene de:

$$K = \sum_{a=1}^L \sum_{r=1}^{L_m} B(a, r) \quad (13)$$

Fueron empleados los siguientes descriptores de textura:

Énfasis de primitivos (Run) largos LRE (Long Run Emphasis):

$$LRE = \frac{1}{K} \sum_{a=1}^L \sum_{r=1}^{L_m} B(a, r) r^2 \quad (14)$$

Énfasis de primitivos (Run) cortos SER (Short Run Emphasis)

$$SER = \frac{1}{K} \sum_{a=1}^L \sum_{r=1}^{L_m} \frac{B(a, r)}{r^2} \quad (15)$$

Uniformidad de nivel de gris GLU (Gray Level Uniformity)

$$GLU = \frac{1}{K} \sum_{a=1}^L \left( \sum_{r=1}^{L_m} B(a, r) \right)^2 \quad (16)$$

Uniformidad de longitud del primitivo (Run) RLU (Run Length Uniformity)

$$GLU = \frac{1}{K} \sum_{r=1}^{L_m} \left( \sum_{a=1}^L B(a, r) \right)^2 \quad (17)$$

Porcentaje de primitivo (Run) RPC (Run Percentage).

$$RPC = \frac{K}{\sum_{n=1}^L \sum_{r=1}^{L_m} r B(a, r)} \quad (18)$$

### 3.3 Matriz de Dependencia de Niveles de Gris de la Vecindad NGLDM (Neighbouring Gray Level Dependence Matrices)

Se buscan características independientes de la orientación, considerando la relación entre un elemento y todos sus vecinos simultáneamente en vez de una sola dirección. Esto elimina la



dependencia angular y reduce el tiempo de cálculo requerido para procesar una imagen. Los parámetros de la matriz son la distancia  $d$  y el umbral  $a$ , de tal forma que se puede obtener una matriz por cada posible combinación de dichos parámetros. La matriz es calculada de la relación de nivel de gris entre cada elemento en la imagen y todos sus vecinos a una cierta distancia  $d$ . La matriz NGLDM es conformada por  $N_G$  filas, correspondiente al número de niveles de gris de la imagen cuantificada y  $N_r$  columnas, donde  $N_r$  es el número de posibles vecinos a un píxel en un rango especificado por  $d$ .

En la Fig. 8 se indica la matriz NGLDM para el caso de una vecindad de distancia  $d=2$ , donde se tienen 16 vecinos para el píxel central Fig 9. El valor 10 que aparece en la celda sombreada indica que al recorrer la imagen, se ha encontrado 10 veces que para un píxel con nivel de gris  $k$ , dicho píxel tenga 8 vecinos cuya diferencia de nivel de gris con el nivel  $k$  sea menor que el umbral  $a$ .

Vecinos	1	2	...	8	...	16
Nivel	1		...		...	
2			...		...	
...			...		...	
k			...	10	...	
...			...		...	
$N_G$			...		...	

Fig. 8. Matriz NGLDM

1	2	3	4	5
16				6
15		*		7
14				8
13	12	11	10	9

Fig. 9. vecindad  $d=2$ 

### 3.3.1 Descriptores de Textura empleados

Se emplearon los siguientes descriptores:

Sea  $Q$  la matriz NGLDM

Énfasis de número pequeño. SNE (*Small Number Emphasis*)

$$SNE = \sum_i \sum_j \left( \frac{Q(i, j)}{j} \right) \quad (19)$$

Énfasis de número Largo LNE (*Large Number Emphasis*)

$$LNE = \sum_i \sum_j (i^2 Q(i, j)) \quad (20)$$

No uniformidad de Número NNU (*Number Non-Uniformity*)

$$NNU = \sum_i \left[ \sum_j Q(i, j) \right]^2 \quad (21)$$

Entropía ENT (*Entropy*)

$$ENT = - \sum_i \sum_j Q(i, j) \log(Q(i, j)) \quad (22)$$

Segundo Momento SM (*Second Moment*)

$$SM = \sum_i \sum_j [Q(i, j)]^2 \quad (23)$$

### 3.4 Medida de Energía de la Textura de Laws

El método de energía de textura para el análisis de textura involucra la aplicación de filtros simples a imágenes digitales (Habit et al., 2004). Laws diseñó estos filtros para destacar características de alta energía de textura en imágenes usando como base filtros Gaussianos, la detección de bordes y filtros de tipo Laplaciano, usando una serie de arreglos de píxeles de impulso obtenidos de una combinación de vectores unidimensionales, estos vectores son divididos en tres vectores base:

$$L3 = [1, 2, 1] \quad E3 = [-1, 0, 1] \quad S3 = [-1, 2, 1] \quad (24)$$

Estos vectores representan promedio (*Level*), detección de bordes (*Edge*) y detección de puntos o manchas (*spots*). Es posible obtener vectores de mayor tamaño para analizar una imagen en diferentes escalas, convolucionando los tres vectores base, obteniendo finalmente cinco vectores llamados máscaras de convolución unidimensionales:

$$E5 = [-1, -2, 0, 2, 1], \quad L5 = [1, 4, 6, 4, 1], \\ R5 = [1, -4, 6, -4, 1], \quad S5 = [-1, 0, 2, 0, -1], \\ W5 = [-1, 2, 0, -2, 1] \quad (25)$$

A partir de estas máscaras unidimensionales, se generan 25 máscaras bidimensionales convolucionándolas como se indica en la tabla 1.

Tabla 1: Máscaras de convolución bi-dimensionales

L5L5	E5L5	S5L5	W5L5	R5L5
L5E5	E5E5	S5E5	W5E5	R5E5
L5S5	E5S5	S5S5	W5S5	R5S5
L5W5	E5W5	S5W5	W5W5	R5W5
L5R5	E5R5	S5R5	W5R5	R5R5

Se generan 25 imágenes parciales al aplicar cada máscara sobre la imagen original. Sobre cada una de estas imágenes se aplica el filtro no lineal que se

indica en la ecuación (26). Generando las 25 imágenes parciales indicadas en la tabla 2.

$$New(x, y) = \sum_{i=-l}^l \sum_{j=-1}^l |Old(x+i, y+j)| \quad (26)$$

**Tabla 2: Imágenes con filtro no lineal**

L5L5T	E5L5T	S5L5T	W5L5T	R5L5T
L5E5T	E5E5T	S5E5T	W5E5T	R5E5T
L5S5T	E5S5T	S5S5T	W5S5T	R5S5T
L5W5T	E5W5T	S5W5T	W5W5T	R5W5T
L5R5T	E5R5T	S5R5T	W5R5T	R5R5T

Se combinan imágenes con información complementaria como se indica en la ecuación (27).

$$E5L5TR = E5L5T + L5E5T \quad (27)$$

Se obtiene de esta forma 10 imágenes transformadas TRimag sobre las cuales se procede a aplicar los descriptores estadísticos de textura para así formar los vectores de características.

$$Energía = \sum_i \sum_j TRimag(i, j) \quad (28)$$

$$Promedio(m) = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j TRimag(i, j) \quad (29)$$

$$Varianza = \frac{1}{(M-1)N} \sum_i \sum_j (TRimag(i, j) - m)^2 \quad (30)$$

$$Skewness = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \frac{(TRimag(i, j) - m)^3}{Var^{3/2}} \quad (31)$$

$$Kurtosis = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \frac{(TRimag(i, j) - m)^4}{Var^2} \quad (32)$$

#### 4. CLASIFICADOR CON SVM

Se presenta en forma compacta los pasos básicos para la implementación del clasificador con una máquina de vectores de soporte SVM (*Support Vector Machines*).

Se conforma la clase  $C_1$  con los vectores de características de las diferentes imágenes correspondientes a imágenes de textiles en buen estado. Y la clase  $C_2$  conformada con los vectores de características de las imágenes correspondientes a muestras con defectos.

Se selecciona una función Kernel. En este trabajo se empleó la función Gaussiana.

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2s^2}\right) \quad (33)$$

Se resuelve el siguiente problema de optimización:

*Maximizar<sub>a</sub>*

$$\sum_{i=1}^N a_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (34)$$

$$\text{Sujeto a : } \sum_{i=1}^N a_i y_i = 0$$

$$0 \leq a_i \leq C \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Se calcula:

$$\hat{b} = -\frac{1}{2} \sum_{i \in VS} \hat{a}_i y_i [K(x_i, x_p) + K(x_i, x_n)] \quad (35)$$

Donde:

$x_i$  Vector soporte  $i$

$x_p$  Vector soporte del plano positivo

$x_n$  Vector soporte del plano negativo

Se conforma la función discriminante:

$$f(x) = \sum_{i \in SV} \hat{a}_i y_i [K(x_i, x) + \hat{b}] \quad (36)$$

Para resolver el problema de optimización se han planteado múltiples soluciones, algunas aparecen referenciadas en (Cristianini y Shawe, 2000). En este trabajo se empleó un algoritmo de programación cuadrática. Para resolver el problema de programación cuadrática es necesario expresar el problema de optimización en forma matricial.

*Minimizar<sub>a</sub>*

$$\frac{1}{2} a^T H a + f^T a \quad (37)$$

$$\text{Sujeto a : } A_{eq} a = 0$$

$$0 \leq a_i \leq C \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Donde

$$H = \begin{bmatrix} y_1 y_1 K_{11} & y_1 y_2 K_{12} & \dots & y_1 y_N K_{1N} \\ y_2 y_1 K_{21} & y_2 y_2 K_{22} & \dots & y_2 y_N K_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_N y_1 K_{N1} & y_N y_2 K_{N2} & \dots & y_N y_N K_{NN} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$K_{ij} = K(x_i, x_j) \quad (39)$$

$$a^T = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_N] \quad (40)$$

$$A_{eq} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N] \quad (41)$$

$$f^T = [-1 \ -1 \ \dots \ -1] \quad (42)$$

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la validación de las técnicas se emplearon un total de 2000 imágenes, 1000 de las cuales corresponden a imágenes de muestras en buen estado y 1000 de muestras con defectos, divididas en grupos de 200 imágenes por cada tipo de defecto.

En la tabla 3, se presentan los porcentajes de acierto obtenidos en la clasificación de las diferentes muestras tanto en buen estado como con los tipos de defectos. Cada columna corresponde al resultado del clasificador con SVM y los vectores de características obtenidos por cada una de las cuatro técnicas de análisis de textura implementadas. Así, por ejemplo, el primer valor de la tabla 98.3 indica que de las 400 imágenes (200 de muestras en buen estado y 200 con defecto de barrado) 393 fueron correctamente clasificadas como buenas o como con defecto, al emplear la técnica GLCM. En esta tabla, a partir del promedio se muestra que el mejor desempeño global se obtiene con la NGLDM y el más bajo con LAWS. Sin embargo se observan algunas variaciones en el desempeño relativo de cada técnica respecto al tipo de defecto.

En la tabla 4 se indica el porcentaje de acierto en la detección de los defectos, así por ejemplo, el primer valor 98.5 indica que de las 200 imágenes correspondientes al defecto de barrado, con la técnica GLCM se reconocieron 197 como con defecto y 3 como si no tuviesen defectos. Aunque en promedio NGLDM presenta el desempeño global más alto, sin embargo se observa que esto varía de acuerdo con el tipo de defecto, así por ejemplo, para barrado GLCM presenta el mayor valor, mientras que para piques y mariposeo el mayor valor se obtiene con LAWS.

Estos datos sin embargo no son completos, si no se tiene en cuenta el porcentaje de falsos aciertos, que corresponden a imágenes de muestras en buen estado clasificadas como defectuosas; en la tabla 5 se indica el porcentaje de falsos aciertos. Los menores errores por falsas detecciones se obtienen con GLCM, mientras que los mayores errores se alcanzan con LAWS.

Se observa en todas las tablas que el tipo de defecto que presenta mayor dificultad en su detección es el de mariposeo, esto debido a su pequeño tamaño que puede hacerlo confundir con el tejido normal.

*Tabla 3: Porcentaje de Acierto de Clasificación*

Defecto/Tec	GLC M	GLRM L	NGLD	LAW S
<b>Barrado</b>	98.3	89.5	93.0	86.5
<b>Manchas</b>	94.0	91.5	99.3	73.5
<b>Mota</b>	94.3	86.5	94.3	79.0
<b>Mariposeo</b>	85.3	81.8	86.5	85.3
<b>Piques</b>	94.3	79.3	95.5	90.8
<b>Promedio</b>	<b>93.2</b>	<b>85.7</b>	<b>93.7</b>	<b>83.0</b>

*Tabla 4: Porcentaje de Defectos Detectados*

Defecto/Tec.	GLC M	GLRM L	NGLD	LAW S
<b>Barrado</b>	98.5	91.5	91.0	95.5
<b>Manchas</b>	92.0	91.5	99.5	68.0
<b>Mota</b>	90.0	84.5	92.0	66.0
<b>Mariposeo</b>	71.5	75.5	75.5	88.0
<b>Piques</b>	91.0	68.0	93.0	98.0
<b>Promedio</b>	<b>88.6</b>	<b>82.2</b>	<b>90.2</b>	<b>83.1</b>

*Tabla 5: Porcentaje de Falsos Aciertos*

Defecto/Tec	GLC M	GLRM L	NGLD	LAW S
<b>Barrado</b>	2.0	12.5	5.0	22.5
<b>Manchas</b>	4.0	8.5	1.0	21.0
<b>Mota</b>	1.5	11.5	3.5	8.0
<b>Mariposeo</b>	1.0	12.0	2.5	17.5
<b>Piques</b>	2.5	9.5	2.0	16.5
<b>Promedio</b>	<b>2.2</b>	<b>10.8</b>	<b>2.8</b>	<b>17.1</b>

## 5. CONCLUSIONES

Se construyó una plataforma que permite emular las condiciones de adquisición de muestras textiles en una máquina tejedora tipo tabular. Se adquirieron muestras del sector industrial con los cinco tipos más comunes de defectos con diferentes formas tamaños. Se implementaron cuatro técnicas espaciales de análisis de textura para obtener a partir de éstas, las características que permitan mediante un clasificador basado en una Máquina de Vectores de Soporte detectar la presencia o no de algún tipo de defecto.

Los resultados muestran que el esquema de extracción de características empleando las técnicas espaciales de análisis de textura, junto con el clasificador con Máquinas de Vectores de Soporte presenta un alto índice de acierto en la

detección de defectos, teniendo en cuenta, que algunos de dichos defectos son muy pequeños haciendo difícil su detección. La técnica que presentó el mayor desempeño global es la NGLDM y la de menor desempeño fue LAWS, sin embargo, se destaca el hecho de que algunas de las características de textura extraídas por las diferentes técnicas son complementarias entre si, de tal forma que algunos defectos se detectan mejor con una técnica que con otra, lo que abre un panorama para trabajos futuros.

### REFERENCIAS

- Habib, Hafiz Adnan; Yousaf, Mohammad Haroon; Mohibullah, M. "Modified Laws Energy Descriptor for Inspection of Ceramic Tiles". University of Engineering and Technology Taxila. National Conference on Emerging Technologies, 2004. p137 - 140.
- Islam, Atiqul; Akhter, Shamim; y Mursalin, Tumnun. "Automated Textile Defect Recognition System Using Computer Vision and Artificial Neural Networks". Proceedings of World Academy of Science, Engineering And Technology. Volumen 13. May 2006. 6p.
- Jiménez, Álvaro. "Análisis de comportamiento de descriptores de la matriz de concurrencia en la extracción de características de textura en imágenes digitales", Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2002, 63p.
- Kulak, Eray. "Analysis Of Textural Image Features For Content Based Retrieval". Submitted to the Graduate School of Engineering and Natural Sciences in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Sabanci University. 2002. 141p.
- Pérez Castilho, Hugo; Sequeira Gonçalves, Paulo Jorge; Caldas Pinto, João Rogério; Limas Serafim, António. "Intelligent Real-Time Fabric Defect Detection. Image Analysis and Recognition". Volume 4633/2007. 2007. P.1297-1307.
- Tuceryan M. and A. K. Jain. "*Texture Analysis*", chapter 2, pages 235-276. World Scientific Publishing Co., 1993.
- Ralló, M.; Millán, M. S. and Escofet, J. "Wavelet based techniques for textile inspection", *Opt. Eng.* 26(2), 838-844 (2003).
- Cristianini, Nello and Shawe, John. "An Introduction to Support Vector Machines" Cambridge University Press. 2000.
- Kwang In Kim, Keechul Jung, Se Hyun Park, and Hang Joon. "Support Vector Machines for for Texture Classification", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 11, November 2002.

**XSPDDL: A XML BASED LANGUAGE FOR WEB ORIENTED DEFINITION OF  
PLANNING DOMAINS****XSPDDL: UN LENGUAJE BASADO EN XML PARA LA DEFINICION DE  
DOMINIOS DE PLANIFICACION ORIENTADOS A LA WEB**

**MSc. Jaime Alberto Guzmán Luna\*, Ing. Daniel Alonso Areiza Zabala\***  
**MSc. Ailín Orjuela Duarte\*\***

**\* SINTELWEB: Grupo de Investigación “Sistemas Inteligentes Web”**  
Escuela de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín  
Calle 59A No 63 – 20, Medellín, Colombia  
{jaguzman, daareiza}@unal.edu.co

**\*\* Grupo CICOM “Ciencias Computacionales” Universidad de Pamplona**  
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 158  
E-mail: aorjuela@unipamplona.edu.co

**Abstract:** This paper defines the syntax and semantics of XSPDDL, an XML-based language used by INDIGO (a Web service composition system) and BAXSET (a service semantic search engine). The ability to handle the basic structure of XML makes it compatible with other Web languages for defining the preconditions and effects associated with semantic Web services. Also, its features allow it to specify planning domains oriented Web.

**Resumen:** Este documento define la sintaxis y semántica del XSPDDL, un lenguaje basado en XML utilizado por INDIGO (un sistema de composición de servicios Web) y BAXSET (un buscador semántico de servicios). La habilidad de manejar las estructuras básicas del lenguaje XML lo hace compatible con otros lenguajes Web utilizados para la definición de las precondiciones y efectos asociados a los servicios Web semánticos. Así mismo, sus características le permiten especificar dominios de planificación orientados a la Web.

**Keywords:** PDDL, XML, semantic web services, automatic planning, artificial intelligence.

## 1. INTRODUCCION

Los servicios Web Semánticos (SWS) (Web services HP, 2007), son servicios Web cuyas descripciones internas y externas están en un lenguaje basado en XML (XML, 2001) y tiene semánticas bien definidas interpretables por las máquinas (McIlraith et al, 2001).

Un tópico importante de los SWS es la composición de servicios. Para soportar la composición de servicios, se han propuesto diversas técnicas provenientes de la planificación Automática (Nau *et al.*, 2004) las cuales asocian los SWS a las acciones de un problema de planificación, realizando para ello una traducción de sus respectivas especificaciones al lenguaje específico de planificación.

En este documento, se presenta el XSPDDL, un Esquema XML (XML, 2001) del PDDL que permite simplificar el parseo, la lectura y la comunicación SOAP usada por los SWS y que dada su habilidad para manejar los espacios de nombres (Namespace, 2006) con URIs (Addressing, 2001) y prefijos lo hace altamente compatible con los lenguajes de especificación de los SWS.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se presenta una visión general de las características que implementa el PDDL; en la sección 3 se describe el XSPDDL donde se detalla su sintaxis y su semántica; en la sección 4, se detallan los principales componentes del lenguaje mediante su aplicación en un dominio específico; en la sección 5, se compara el XSPDDL con los principales trabajos del estado del arte que dirigen sus esfuerzos a generar una versión de PDDL mas cercana a los lenguajes usados para especificar los SWS.

## 2. UNA VISION GENERAL DEL PDDL

La comunidad de la planificación IA en general utiliza formalismos diferentes para expresar los dominios de planificación. Uno de estos formalismos es el PDDL (*Planning Domain Definition Language*) (Fox y Long, 2003). El PDDL, fue desarrollado como el lenguaje de entrada de los planificadores utilizados para la Competición Internacional de Planificación (IPC) desde 1998. A lo largo de las diferentes IPC, el PDDL ha evolucionado para cubrir las necesidades de representación de los nuevos retos formulados en dicho evento.

El PDDL1.2 (utilizado en el IPC-1998 e IPC-2000) contenía el STRIPS (Fikes y Nilsson, 1971) y la funcionalidad del ADL (Pednault, 1989) más el uso de variables con tipo. El PDDL2.1 (IPC-2002) aumentó la versión original del PDDL con: (i) Las variables numéricas y la capacidad de evaluar y actualizar sus valores; y (ii) Las acciones con duración tanto con efectos discretos y continuos. El PDDL2.2 (IPC-2004) amplió las versiones anteriores con el manejo de: (i) predicados derivados que le permiten al planificador razonar sobre conceptos de alto nivel en el dominio, donde tales conceptos pueden ser definidos de forma recursiva y (ii) literales iniciales temporales, los cuales son literales que serán verdaderos en un tiempo predecible independiente de lo que el agente de planificación hace. El PDDL3.0 (IPC-

2006) enriquece la expresividad del lenguaje para definir: (i) las restricciones en las transiciones del estado, (ii) las preferencias de objetivos y trayectoria del estado que el plan solución debe seguir. Por último, el PDDL3.1 (IPC-2008) soporta el STRIPS funcional (Geffner, 2001). STRIPS funcional es una codificación diferente para el dominio de la planificación. En lugar de mapear los literales del problema de planificación a verdadero o falso, el STRIPS funcional mapea los objetos del problema de planificación a sus propiedades.

Esta codificación proporciona un modelo más natural para muchos dominios de planificación y hace más fácil la extracción de algunas heurísticas, tal como la heurística del grafo causal (Helmert y Geffner, 2008) o la base de datos de patrones (Edelkamp, 2003).

Aunque el PDDL3.1 cubre todas las anteriores funcionalidades, la mayoría de los planificadores no las implementan. En general, la mayoría solo soportan las características del STRIPS además de las variables con tipo y el predicado de igualdad.

Para brindar un mejor acercamiento a este lenguaje, a continuación se describe la especificación PDDL de uno de los dominios más conocidos dentro de la planificación clásica, el mundo de los bloques (ver Fig. 1).

Este dominio de planificación consiste en alcanzar a partir de un estado inicial, conformado por un conjunto ordenado de bloques, un estado objetivo, que consiste en un nuevo conjunto ordenado de bloques. Para tal fin, se describe cada una de las acciones sobre los bloques y los respectivos estados inicial y final.

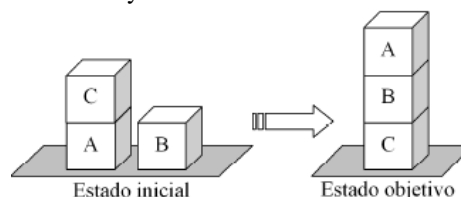


Fig. 1. Problema del Mundo de los Bloques

En general la especificación de un problema de planificación en PDDL consta de la especificación del dominio y de la especificación de su respectivo problema. Para el mundo de los bloques esta especificación podría ser la detallada en la Fig. 2.



<u>Especificación del Dominio</u>	<u>Especificación del Problema</u>
(define (domain BLOCKS))	(define (problem Sussman))
(:requirements :strips :typing)	(:domain BLOCKS)
(:types block)	(:objects A B C)
(:predicates (on ?x - block ?y - block))	(:init
(ontable ?x - block)	(on C A)
(clear ?x - block)	(ontable A)
(handempty)	(ontable B)
(holding ?x - block))	(clear B)
	(clear C)
(:action put-down	(handempty))
:parameters (?x - block)	
:precondition (holding ?x)	(:goal (and (on A B) (on B C))))
:effect (and (not (holding ?x))	
(clear ?x) (handempty)	
(ontable ?x)))	

Fig. 2. PDDL del Mundo de los Bloques

Basado en la Fig. 2, la especificación del Dominio en PDDL puede constar básicamente de: (i) el nombre del dominio definido mediante la sentencia *domain*; (ii) la especificación de los requerimientos del dominio, definidos mediante la sentencia *requirements*; (iii) Las variables con tipos a utilizar, definidas mediante la sentencia *types*; (iv) los predicados del dominio definidos mediante la sentencia *predicates* y que describen las propiedades de los objetos que conforman el problema (v) las acciones del dominio que se definen mediante la sentencia *action* y detallan la manera en que se cambia el mundo del dominio, esta consta de los parámetros que requiere la acción (*parameters*), las precondiciones que son necesarias para que la acción se lleve a cabo (*precondition*) y los efectos que esta acción produce (*effect*).

Así mismo, basado en la Fig. 2, la especificación del Problema en PDDL puede constar básicamente de: (i) los objetos que conforman el dominio y que están asociados a los diferentes tipos definidos en el dominio (*objects*); (ii) el estado inicial (*init*) el cual detalla el estado actual del mundo que se describe y consta de un conjunto instanciado de predicados; (iii) el estado objetivo al cual queremos llegar (*goal*).

### 3. EL XSPDDL

La tecnología XML busca dar solución al problema de expresar información estructurada de la manera más abstracta y reutilizable posible generando documentos que hacen uso de etiquetas. Las etiquetas tienen la forma *<nombre>*, donde *nombre* es el nombre del elemento que se está señalando.

Cada documento XML debe de tener validez, la cual se denomina comúnmente como “que el documento este bien formado”. Que un documento esté “bien formado” solamente se refiere a su estructura sintáctica básica, es decir, que se componga de elementos, atributos y comentarios como XML especifica que se escriban. Esta especificación se encuentra en un documento externo o definición del Esquema XML. Un Esquema XML (XML-Schema) (XML Schema, 2001) permite describir la estructura y las restricciones de los contenidos de los documentos XML de una forma muy precisa, más allá de las normas sintácticas impuestas por el propio lenguaje XML. El principal aporte del Esquema XML es el gran número de tipos de datos que incorpora tales como fechas, números y *strings* entre otros.

En conjunto con XML y el Esquema XML, se desarrolló XPath (XPath, 1999), el cual es un lenguaje que permite construir expresiones que recorren y procesan un documento XML. XPath permite buscar y seleccionar elementos de un documento teniendo en cuenta la estructura jerárquica del XML que es procesada por un analizador (o parser) construyendo un árbol de nodos.

El XSPDDL, es una versión del PDDL2.1 basada en un Esquema XML, que permite definir tanto la estructura del dominio de un problema de planificación (*domain* en PDDL), como su respectiva especificación del problema (*problem* en PDDL). Con el fin de definir la sintaxis del XSPDDL, a continuación primero se definen la lista de símbolos: (i) paréntesis angulares (<, >) identifica las etiquetas de un elemento XML; (ii) paréntesis Cuadrados ([, ]) delimita los nombres de los elementos sintácticos; (iii) las llaves ({, }) representa un elemento adicional; (iv) el asterisco (\*) significa “cero o más de” y (v) un más (+) significa “uno o más de”.

Así la sintaxis del XSPDDL que permite representar un dominio se detalla en Fig. 3 y la sintaxis del XSPDDL que permite representar un problema se detalla en Fig. 4. En cuanto a su semántica, el XSPDDL se basa en la semántica definida en la versión del PDDL2.1 (Fox y Long, 2003) para cada una de sus estructuras, extendiéndola al considerar acciones de sensado (*sensing-action*) para adquirir información del entorno.

[domain]	::= <domain name="[NCName]"> (([require-def]) ([types-def]) ([constants-def]) ([predicates-def]) ([functions-def]) [actions-def]) </domain>	[action-def body]	::= <parameters> [typed-vars-list]+ </parameters> ([duration-def]) ([condition-def]) ([precondition-def]) ([effect-def])	[binary-def]	::= <equals> [logical-def] </equals>
[require-def]	::= <requirements> [require-key]+ </requirements>	[duration-def]	::= <duration> [GD] </duration>	[logical-def]	::= [f-exp]
[require-key]	::= <req> [require-list] </req>	[condition-def]	::= <condition> [timed-gd] </condition>	[f-exp]	::= [number]
[require-list]	::= strips   typing   negative-preconditions   disjunctive-preconditions   equality   existential- preconditions   universal-preconditions   quantified-preconditions   conditional- effects   fluents   adl   durative-actions   duration- inequalities   continuous-effects	[precondition-def]	::= <precondition> [GD] </precondition>	[f-exp]	::= [untyped-vars-list]
[types-def]	::= <types> [typed-list]+ </types>	[effect-def]	::= <effect> [effect-def body] </effect>	[f-exp]	::= [binary-op]
[typed-list]	::= <type super="[NCName]"> [NCName] </type>	[GD]	::= [atomic-formula]	[number]	::= <value> [FloatNumber] </value>
[typed-list]	::= <type> /*Default:super=object*/ [NCName] </type>	[GD]	::= <and> [GD] </and>	[binary-op]	::= <add> [logical-def] </add>
[constants-def]	::= <constants> [constant-list]+ </constants>	[GD]	::= <not> [GD] </not>	[binary-op]	::= <subtract> [logical-def] </subtract>
[constant-list]	::= <constant type="[NCName]"> [NCName] </constant>	[GD]	::= <or> [GD] </or>	[binary-op]	::= <multiply> [logical-def] </multiply>
[constant-list]	::= <constant> /*Default:type=object*/ [NCName] </constant>	[GD]	::= <exists> [cond-def] </exists>	[binary-op]	::= <divide> [logical-def] </divide>
[predicates-def]	::= <predicates> [atomic-predicate]+ </predicates>	[GD]	::= <forall> [cond-def] </forall>	[f-head]	::= <func name="[NCName]"> [atomic-formula-struct] </func>
[atomic-predicate]	::= <pred name="[NCName]"> [typed-vars-list]* </pred>	[GD]	::= <when> [GD] </when>	[atomic-formula-struct]	::= [untyped-vars-list]*
[typed-vars-list]	::= <param type="[NCName]"> [variable] </param>	[GD]	::= [binary-def]	[atomic-formula-struct]	::= [binary-op]*
[typed-vars-list]	::= <param> /*Default:type=object*/ [variable] </param>	[atomic-formula]	::= <pred name="[NCName]"> [untyped-vars-list]* </pred>	[atomic-formula-struct]	::= [f-head]*
[variable]	::= [string]	[cond-def]	::= ([vars-def]) [GD] </GD>	[timed-gd]	::= <at-start> [GD] </at-start>
[string]	::= any combination of characters containing only letters and underscores (must start with a letter)	[vars-def]	::= [untyped-vars-list]+	[timed-gd]	::= <at-end> [GD] </at-end>
[NCName]	::= any legal XML NCName symbol	[untyped-vars-list]	::= <param> [variable] </param>	[timed-gd]	::= <over-all> [GD] </over-all>
[functions-def]	::= <functions> [atomic-function]+ </functions>	[untyped-vars-list]	::= <var> [variable] </var>	[timed-gd]	::= <and> [timed-gd]+ </and>
[atomic-function]	::= <func name="[NCName]"> [typed-vars-list]* </func>	[untyped-vars-list]	::= <cons> [NCName] </cons>	[effect-def body]	::= [atomic-formula]
[actions-def]	::= <actions> [action-def]+ </actions>	[binary-def]	::= <gt> [logical-def] </gt>	[effect-def body]	::= <not> [effect-def body] </not>
[action-def]	::= <action name="[NCName]"> [action-def body] </action>	[binary-def]	::= <ge> [logical-def] </ge>	[effect-def body]	::= <and> [effect-def body] </and>
[action-def]	::= <sensing name="[NCName]"> [action-def body] </sensing>	[binary-def]	::= <le> [logical-def] </le>	[effect-def body]	::= <forall> [cond-def] </forall>
				[effect-def body]	::= <when> [effect-def body] [effect-def body] </when>
				[effect-def body]	::= <increase> [logical-assign-def] </increase>
				[effect-def body]	::= <decrease> [logical-assign-def] </decrease>
				[effect-def body]	::= <scaleup> [logical-assign-def] </scaleup>
				[effect-def body]	::= <scaledown> [logical-assign-def] </scaledown>
				[logical-assign-def]	::= [f-head] [f-exp]

Fig. 3. Sintaxis BNF del XSPDDL para la definición del dominio

[domain]	::= <problem name="[NCName]"> [domain-def] {[objects-dec]} [init-def] [goal-def] {[metric-def]} </problem>	[obj-list]	::= <obj> /*Default type=object*/ [NCName] </obj>	[goal-def]	::= <goal> [GD] </goal>
[domain-def]	::= <domain> [NCName] </domain>	[init-def]	::= <init> [init-list]+ </init>	[metric-def]	::= <metric> [metric-opt] </metric>
[objects-dec]	::= <objects> [obj-list]+ </objects>	[init-list]	::= [atomic-formula] [init-list]	[metric-opt]	::= <minimize> [ground-f-exp] </minimize>
[obj-list]	::= <obj type="[NCName]"> [NCName] </obj>	[init-list]	::= <not> [atomic-formula] </not>	[metric-opt]	::= <maximize> [ground-f-exp] </maximize>
		[init-list]	::= <assign> [f-head] [number] </assign>	[ground-f-exp]	::= [f-exp]
				[ground-f-exp]	::= <total-time />

Fig. 4. Sintaxis BNF del XSPDDL para la definición del problema

#### 4. UN EJEMPLO DEL XSPDDL

Con el fin de dar una mejor claridad de la aplicación del XSPDDL a continuación se describen las principales estructuras que conforman el dominio y el problema del mundo de los bloques usando este lenguaje. La primera estructura que hace parte de la definición del dominio, es la estructura *domain*. Esta estructura contiene el atributo *name* para especificar el nombre del dominio. Como se detalla en Fig 3, esta es la estructura que contiene los demás elementos que componen la definición del dominio:

PDDL	(define (domain BLOCKS)
XSPDDL	<domain name="BLOCKS">

Veamos ahora la estructura de los *requirements*. Esta estructura define los requerimientos del dominio, una lista de elementos *req* que contienen un *string* con el tipo de requerimiento a utilizar por el planificador:

PDDL	(:requirements :strips :typing)
XSPDDL	<requirements> <req>strips</req> <req>typing</req> </requirements>

La estructura siguiente, *type*. Esta estructura define los tipos del dominio utilizando en su interior una lista de elementos *type*. Estos últimos, contienen a su vez un *string* con el tipo a utilizar por el planificador:

PDDL	(:types block)
XSPDDL	<types> <type>block</type> </types>

La siguiente estructura, que vale la pena detallar es la estructura *predicates*. Esta estructura está compuesta por una lista de *pred*, que representan

los predicados asociados al dominio. Estos a su vez contienen una lista de *param* que permiten especificar el tipo del parámetro por medio de su atributo *type* y el nombre del mismo parámetro mediante el uso de un *string* contenido en su interior:

PDDL	(:predicates (on ?x - block ?y - block)
XSPDDL	<predicates> <pred name="on"> <param type="block">x</param> <param type="block">y</param> </pred>

Por último, se tiene la estructura *actions*. Dada su complejidad, con el fin de dar una mejor claridad de la misma, se dividirá en sus sub-estructuras. La primera sub-estructura es la estructura *parameters*, la cual solo es una lista de etiquetas de tipo *param* que representan los parámetros que serán utilizados por la acción:

PDDL	(:action pick-up: parameters (?x - block)
XSPDDL	<actions> <action name="pick-up"> <parameters> <param type="block">x</param> </parameters>

La siguiente sub-estructura es la *preconditions*:

PDDL	:precondition (and (clear ?x) (ontable ?x) (handempty))
XSPDDL	<preconditions> <and> <pred name="clear"> <param>x</param> </pred> <pred name="ontable"> <param>x</param> </pred> <pred name="handempty" /> </and> </preconditions>

Para el caso particular del mundo de los bloques, la anterior especificación contiene una estructura *and*, la cual a su vez contiene una lista de etiquetas de tipo *pred* que representan los predicados asociados a las precondiciones que se deben satisfacer para que la acción se pueda ejecutar.

Por último, la sub-estructura *effects*. En el caso del mundo de los bloques esta se compone de una estructura *and* la cual contiene una estructura *pred* y una estructura *not*, etiqueta que especifica un predicado negado:

PDDL	<pre> :effect (and (not (ontable ?x)) (not (clear ?x)) (not (handempty)) (holding ?x)) </pre>
XSPDDL	<pre> &lt;effects&gt; &lt;and&gt; &lt;not&gt;   &lt;pred name="ontable"&gt;     &lt;param&gt;x&lt;/param&gt;   &lt;/pred&gt; &lt;/not&gt; :   &lt;pred name="holding"&gt;     &lt;param&gt;x&lt;/param&gt;   &lt;/pred&gt; &lt;/and&gt; &lt;/effects&gt; </pre>

En cuanto a las estructuras utilizadas para la definición del problema este está inicialmente conformado por la estructura *problem*:

PDDL	<pre> (define (problem Sussman) (:domain BLOCKS) </pre>
XSPDDL	<pre> &lt;problem name="Sussman"&gt;   &lt;domain&gt;BLOCKS&lt;/domain&gt; : &lt;/problem&gt; </pre>

La anterior estructura esta conformada por un atributo *name*, que define el nombre del problema y contiene en su interior una etiqueta *domain* en cuyo interior se detalla el nombre del dominio asociado al problema. Este último elemento es de tipo *string*:

Para definir los objetos presentes en el problema, se utiliza la estructura *objects*. Esta contiene una lista de etiquetas tipo *obj*, que permiten describir los objetos que conformaran el problema de planificación. Cada *obj* contiene un elemento tipo *string* que permite describir el elemento (por ejemplo A, B C):

PDDL	<pre> (:objects A B C) </pre>
XSPDDL	<pre> &lt;objects&gt;   &lt;obj&gt;A&lt;/obj&gt; </pre>

```

<obj>B</obj>
<obj>C</obj>
</objects>

```

Para definir el estado inicial del problema con XSPDDL se utiliza su estructura *init*. Esta estructura esta conformada por una lista de etiquetas de tipo *pred*, que representan los predicados instanciados del problema. Cada *pred* contiene el atributo *name* que permite asignarle el nombre del predicado y en su interior, cada *pred* contiene una lista de etiquetas de tipo *obj*:

PDDL	<pre> (:init (on C A)) </pre>
XML	<pre> &lt;init&gt;   &lt;pred name="on"&gt;     &lt;obj&gt;C&lt;/obj&gt;     &lt;obj&gt;A&lt;/obj&gt;   &lt;/pred&gt; : &lt;/init&gt; </pre>

Por último, se utiliza la estructura *goal*, la cual permite especificar el estado objetivo del problema. Para este dominio, el *goal* contiene una etiqueta de tipo *and*, la cual contiene una lista de elementos de tipo *pred* que representan los predicados deseados en el estado objetivo:

PDDL	<pre> (:goal (and (on A B) (on B C))) </pre>
XML	<pre> &lt;goal&gt;   &lt;and&gt;     &lt;pred name="on"&gt;       &lt;obj&gt;A&lt;/obj&gt;       &lt;obj&gt;B&lt;/obj&gt;     &lt;/pred&gt;     &lt;pred name="on"&gt;       &lt;obj&gt;B&lt;/obj&gt;       &lt;obj&gt;C&lt;/obj&gt;     &lt;/pred&gt;   &lt;/and&gt; &lt;/goal&gt; </pre>

## 5. TRABAJOS RELACIONADOS

El XSPDDL ha sido utilizado tanto en la definición de servicios Web Semánticos OWL-S (OWL-s, 2007) como en la definición del problema de composición del sistema INDIGO (Guzmán y Ovalle, 2008), un modelo de planificación de composiciones de servicios Web. Así mismo, este lenguaje es utilizado en el “Sistema de Recuperación Semántico de Servicios Web Basado en un Modelo de Navegación Taxonómica” (BAXSET, 2009), para especificar los SWS de tipo OWL-S.

Al interior de INDIGO y de BAXET, el XSPDDL es utilizado para la especificación de las precondiciones y efectos de los SWS. Para tal fin, se ha extendido la ontología *expression* que hace parte del OWL-S para incluir en ella el lenguaje

XSPDDL. Así mismo, al interior de los dos anteriores mecanismos, se ha desarrollado un analizador sintáctico basado en el modelo DOM (DOM, 2005) que verifica la correctitud de las especificaciones XSPDDL al igual que se ha desarrollado específicamente en INDIGO un traductor de OWL-S a XSPDDL que permite especificar un problema de composición de servicios Web como un problema de planificación en XSPDDL, lenguaje utilizado por el planificador que implementa este modelo.

Actualmente existe un alto interés en el desarrollo de notaciones para describir servicios Web. Un primer ejemplo de esto es el Web-PDDL, el cual es un lenguaje de ontologías fuertemente tipado basado en una lógica de primer orden extendido desde el PDDL. Este permite expresar espacios de nombres XML que lo hacen compatible con lenguajes de ontologías tales como el RDF y el OWL. La presencia de tipos, le permite realizar la comprobación de tipos durante el razonamiento. En contraste con el XSPDDL, el Web-PDDL es un lenguaje de ontología que requiere de un razonador lógico para su uso, mientras que el XSPDDL esta basado en el XML y el Esquema XML, lo que lo hace independiente del uso de un razonador lógico y simplemente con un simple interprete de XML se puede utilizar fácilmente. Esta cualidad del XSPDDL lo hace más rápido en cuanto al parseo de una especificación y su uso en diferentes áreas de aplicación.

Otra propuesta existente en la literatura es el XPDDL (Gough, 2004). Esta es una versión XML del PDDL2.1. Si bien este trabajo va en la misma dirección del XSPDDL, estos dos lenguajes se diferencian en la conformación de sus estructuras sintácticas que lo conforman. En el caso del XPDDL, utiliza las estructuras básicas del Esquema XML para la definición de los elementos que componen el lenguaje PDDL. En el caso del XSPDDL, adicionalmente a las estructuras básicas del Esquema XML, este utiliza el XPath para definir tareas internas de verificación automáticas entre los elementos que conforman el lenguaje. Esto no es implementado por el XPDDL. Adicionalmente, el XPDDL se basa en la simplificación del mundo cerrado (Golden et al, 1994), es decir, considera que los hechos del mundo que no se encuentran especificados en el modelo son falsos. En contraste con esto el XSPDDL, se basa en el mundo abierto, donde un hecho que no sea considerado en la base de conocimiento del sistema no necesariamente quiere decir que es falso. Para ello el XSPDDL extiende

la especificación del PDDL2.1 y considera acciones de sensado que le permiten adquirir información del mundo real, sin que esto implique un cambio de este mundo.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este documento se ha propuesto un lenguaje para la definición de dominios de planificación orientado a la Web. Este lenguaje permite implementar la semántica del PDDL, lenguaje estándar de la planificación automática. Este lenguaje a diferencia de otras propuestas se basa en la tecnología XML y el Esquema XML. Adicionalmente permite modelar el mundo bajo el enfoque del mundo abierto, para lo cual extiende el PDDL2.1 utilizando acciones de sensado que permiten adquirir información del mundo en vez de cambiarlo.

El lenguaje XSPDDL ha sido utilizado en aplicaciones del mundo real como el sistema de composición de servicios INDIGO y el buscador semántico de servicios Web BAXSET. En estos ha sido utilizado para especificar las precondiciones y efectos de los SWS al igual que en la especificación de un problema de planificación de composiciones de servicios Web.

Como trabajo futuro, se plantea extender tanto la sintaxis como la semántica de este lenguaje para que permita representar algunas características propias del lenguaje de ontología OWL, como son el manejo de la cardinalidad en sus propiedades, así como sus propiedades *inverseFunctional*, *Symmetric* y *Transitive* lo cual permitirá hacerlo mas expresivo.

## 7. RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo está apoyado parcialmente en el proyecto “Un Sistema de Recuperación Semántico de Servicios Web Basado en un Modelo de Navegación Taxonómica” apoyado por la DIME, de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y la Tesis de Doctorado “Modelo de Planificación y Ejecución Concurrente para la Composición de Servicios Web Semánticos en Entornos Parcialmente Observables”, auspiciada por Colciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y el Banco Mundial, enmarcado en el programa de apoyo a la comunidad científica nacional en programas de Doctorado 2004.



## REFERENCIAS

- Addressing: <http://www.w3.org/Addressing/> (2001). Última visita agosto 2009.
- BAXSET (2009). *Un Sistema de Recuperación Semántico de Servicios Web Basado en un Modelo de Navegación Taxonómica. Proyecto de Investigación, apoyado y financiado por el Departamento de investigación DIME de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Convocatoria Conmemorativa Darwin, 2009.*
- DOM (2005). <http://www.w3.org/DOM>. Última visita agosto de 2009.
- Morales E. (2006). Programación Lógica Inductiva (ILP), <http://ccc.inaoep.mx/~emorales/> ultima visita septiembre de 2007.
- Edelkamp S. (2003). Taming numbers and durations in the model checking integrated planning system. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 20:195- 238,
- Fikes R.E. y Nilsson N.J. (1971) STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, 2:189-208, 1971.
- Fox M. y Long D. (2003) PDDL2.1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 20:61{124, 2003.
- Geffner H. (2001) Functional STRIPS: a more flexible language for planning and problem solving. *Logic-Based Artificial Intelligence*, Jack Minker (Ed.), Kluwer, 2001.
- Gough, J., 2005, "XPDDL: A XML version of PDDL". Available in: <http://www.cis.strath.ac.uk/jg/XPDDL/>, (accessed in April 2007).
- Golden K., Etzioni O., y Weld D.. Omnipotence without omniscience: Efficient sensor management for planning. *National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, pages 1048-1054, 1994.
- Guzmán J. y Ovalle A. (2008). INDIGO: Una Propuesta de Planificación en Inteligencia Artificial para la Composición Automática de Servicios Web Semánticos. VII Jornadas de Ingeniería de Software e Ingeniería del Conocimiento 2008, Guayaquil Ecuador.
- Helmert, M., y Geffner, H. (2008). Unifying the causal graph and additive heuristics. In *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2008)*, 140–147.
- Hoffmann J., (2003). The Metric-FF Planning System: Translating Ignoring Delete Lists to Numeric State Variables, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 20.
- IPC (2004). International Planning Competition 2004. <http://ipc.icaps-conference.org/>. Última visita agosto de 2009.
- IPC (2006). <http://ipc.icaps-conference.org/>. Última visita agosto de 2009.
- IPC (2008). International Planning Competition 2004. <http://ipc.icaps-conference.org/>. Última visita agosto de 2009.
- Jiménez S, Fernando Fernandez and Daniel Borrajo, (2006). Inducing non-deterministic actions behavior to plan robustly in probabilistic domains", In: *Working notes of the ICAPS'06 Workshop on Planning under Uncertainty and Execution Control for Autonomous Systems*.
- Jiménez S., (2007) Planning and Learning under Uncertainty, *disertacion para Ph.D., Escuela Politécnica Superior Ingeniería Informática, Universidad Carlos III de Madrid*.
- McIlraith S., Son T. C., and Zeng H. (2001). Semantic Web Services, *IEEE Intelligent Systems*, 16(2). 46 – 53.
- Namespace: <http://www.w3.org/TR/REC-xml-names/>, año 2006. Última visita Agosto de 2009.
- Nau D., Ghallab M. and Traverso P. (2004). *Automated Planning: Theory and Practice*, Morgan Kaufman.
- OWL-S. Semantic Markup for Web Services. <http://www.w3.org/Submission/OWLS/>, última visita septiembre de 2007.
- Pednault E.P.D. (1989). ADL: exploring the middle ground between STRIPS and the situation calculus. *Proceedings of the first international conference on Principles of knowledge representation and reasoning*, pages 324-332, 1989.
- Web services HP, Web Services Concepts: a Technical Overview, HP Document, [http://www.bluestone.com/downloads/pdf/web\\_services\\_tech\\_overview.pdf](http://www.bluestone.com/downloads/pdf/web_services_tech_overview.pdf), ultima visita septiembre de 2007.
- XMLSchema: <http://www.w3.org/XML/Schema> (2001). Última visita Agosto 2009.
- Xpath: <http://www.w3.org/TR/xpath> (1999). Última visita, Agosto de 2009.



## ACTIVE POWER FILTER IN PARALLEL: ANALYSIS AND DESIGN

## FILTRO ACTIVO DE POTENCIA EN PARALELO: ANALISIS Y DISEÑO

MSc. Pedro Fabian Cárdenas\*, MSc. Fabian Jimenez\*\*  
MSc. César Augusto Peña Cortes\*\*\*

\* Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.  
Cra. 30 No. 45-03, Edificio 453; E-mail: pfcardenash@unal.edu.co.

\*\* Universidad Santo Tomas, Tunja.  
Tel: 057-7440404-Ext. 1050; E-mail: fjimenez@ustatunja.edu.co.

\*\*\* Universidad de Pamplona, Pamplona.  
Ciudadela Universitaria, E-mail: cesarapc@unipamplona.edu.co.

**Abstract:** The power active filters have been a viable alternative for controlling harmonic levels in industrial and commercial applications. This paper presents a brief operation analysis discusses the detailed study of the Shunt Active Power Filter structure (APF). The analysis of some definition of power and currents, it needs to filter operation. In order to validate and discuss the details and the criterion design of an APF, it was made simulations using the proposed.

**Resumen:** Los Filtros activos de potencia han sido una alternativa viable para el control de nivel de armónicos en aplicaciones industriales y comerciales. Se realiza un breve análisis de la operación y las partes más importantes de un Filtro Activo Paralelo (FAP). Para discutir y validar los detalles y los aspectos relacionados con el diseño de un (FAP), se presentan simulaciones del modelo diseñado.

**Keywords:** Active Power Filter, Harmonics, Active Compensation.

### 1. INTRODUCCION

Este documento proporciona inicialmente la descripción de un Filtro Activo de Potencia (FAP) en configuración paralela, utilizado para reducir los componentes armónicos en las cargas del sistema de potencia trifásico seguido por el diseño y la simulación de un modelo del filtro.

Los armónicos de corriente son originados por la existencia de cargas no lineales conectadas en el sistema de potencia (Christopher y McGranaghan, 1992). Se dice que una carga es lineal cuando existe una relación lineal entre la tensión y corriente, es decir una carga lineal absorbe una corriente sinusoidal cuando se alimenta con una

tensión sinusoidal, aun presentado un desfase de  $j$  grados respecto a la tensión. Cuando esta relación no se cumple, se habla de una carga no lineal. Ésta absorbe una corriente no sinusoidal que va acompañada de corrientes armónicas, a pesar de estar alimentada por una tensión puramente sinusoidal. En (Collombet *et. al*, 2003) se presentan diferentes tipos de cargas y posibles soluciones para la reducción de armónicos en sistemas de potencia. En (Bettega y Fiorina 2003) se describen los problemas en cargas activas y la utilización de compensadores activos.

En la Fig. 1. se muestra el principio de operación de un filtro activo paralelo. Un FAP puede verse simplemente como una fuente de corriente o

tensión controlable, que se conecta directamente o a través de un transformador al sistema de potencia. FAP se basa en un control de lazo cerrado de un convertidor electrónico de potencia (Inversor), que inyecta en el sistema una corriente o tensión lo más fiel posible a una referencia dada. Esta corriente o tensión mantiene activamente la corriente que circula por la fuente libre de armónicos (Akagi, 1995).

Hoy en día es posible realizar un dispositivo que cumpla con la acción de inyectar corriente o tensión en un sistema de potencia, éste se logra gracias a la electrónica de potencia y los sistemas de control automático. Con la utilización de convertidores en diferentes configuraciones y formas de operación, se pueden obtener dichas acciones.

En general existen dos tipos de convertidores operando en modo inversor, inversor por fuente de corriente (CSI - *Current Source Inverter*) o inversor fuente de tensión (VSI - *Voltage Source Inverter*), con estos dispositivos es posible inyectar armónicos de una manera especial (contra fase), logrando que la frecuencia de la señal de corriente que suministra la fuente de alimentación sea única.

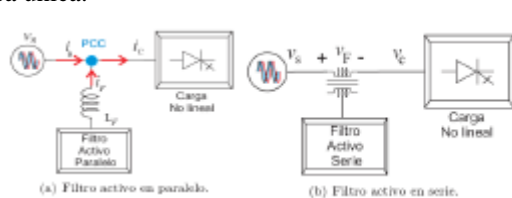


Fig. 1. Filtro activo paralelo, principio de operación

Con la inserción de un FAP en un sistema de potencia y un control adecuado es posible compensar la energía reactiva de la carga (Rossetto, 1992), al igual que el desbalance de corriente entre fases (Akagi, 1995; Akagi, 1996), también presenta una rápida respuesta dinámica, que logra compensar perturbaciones transitorias y no periódicas, por último presenta un amplio ancho de banda de compensación de las corrientes armónicas.

Los FAPs en paralelo representan un campo de aplicación extremadamente exigente para los convertidores de modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal (SPWM - *Sinusoidal Pulse Wide Modulation*). Independientemente de lo que suceda en los variadores de velocidad ajustable o en las aplicaciones de rectificadores por PWM, el control de corriente de los FAP se requiere para generar

una forma de onda de corriente que sea caracterizada por un contenido armónico que compense la corriente distorsionada generada por las cargas no lineales (Mohan, 2003).

## 2. ANALISIS Y OPERACION

### 2.1 Principio de Operación de un FAP

Los desarrollos en la teoría e implementación de los FAPs han propuesto un gran número de topologías. Dentro de cada topología existen características requeridas en cuanto a componentes, aplicaciones y estrategias de control, por lo cual es importante saber seleccionar el filtro apropiado para asegurar que los efectos de las cargas contaminantes sean totalmente compensados.

El objetivo principal del filtro activo paralelo es lograr que la corriente de la fuente  $i_s$  se mantenga lo más parecida a una onda sinusoidal. El filtro activo paralelo instantáneamente inyecta una corriente ( $i_f$ ) cuya componente armónica es de la misma amplitud que la de la carga pero en oposición de fase, entonces la suma algebraica en el punto (PCC) ( $i_{carga} = i_s + i_f$ ) garantiza que la corriente entregada por la fuente sea una señal sinusoidal pura (Malesani *et al.*, 1986).

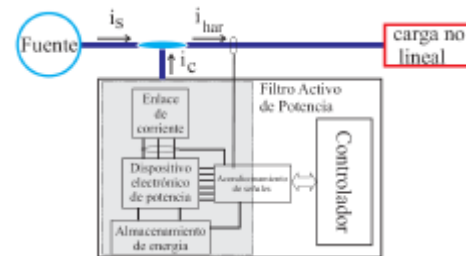


Fig. 2. Estructura básica de un FAP

### 2.2 Estructura Básica del FAP

En la Fig. 2. se observa un filtro activo de potencia en paralelo genérico, utilizado para la compensación o eliminación de las corrientes no activas que circulan por la fuente. El filtro está conformado por cinco bloques funcionales: El convertidor de potencia, el enlace de corriente entre el convertidor y el punto de conexión con la red, el dispositivo de almacenamiento de energía, los dispositivos de acondicionamiento de señales provenientes del sistema de potencia y el controlador. Los cuatro primeros bloques se pueden agrupar en una sola unidad denominada unidad de potencia, mientras que el controlador es un gran bloque encargado de la generación de

referencias, la regulación del voltaje del lado de DC y de corriente inyectada, y por supuesto el seguimiento del convertidor.

### 2.3 Bloque de Potencia

Es el encargado de realizar la inyección de las corrientes de compensación en la red, éste se logra gracias a un adecuado sistema de control que garantice que las corrientes inyectadas realmente sigan las señales aportadas como referencia. Idealmente, el conjunto de convertidor (condensadores, inductancias y dispositivos de conmutación) más controlador de corriente, pueden comportarse como una fuente lineal, capaz de inyectar en todo momento las corrientes de compensación que se le aporten como referencia. Este comportamiento es imposible de ser alcanzado debido a las características no lineales del convertidor, sin embargo en cierto rango de operación el convertidor tendrá un comportamiento lineal.

En lo que se refiere al convertidor hay dos topologías de inversores (CSI y VSI), las cuales han sido ampliamente estudiadas, para el desarrollo de filtros activos, siendo la más utilizada la configuración en VSI, debido a su eficiencia y costos de fabricación (Akagi, 1996). Dentro de las topologías de inversores por VSI están: convertidor de tres ramas en puente completo (TLBF - *Three-Leg Full-Bridge*) o el inversor de tres ramas con condensador repartido (TLSC - *Three Leg Split-Capacitor*), ver Fig. 3. Entre otros. EL TLSC tiene conectado el neutro de la carga con el punto intermedio del bus de DC (punto  $n$ ) y las tres ramas pueden trabajar de manera independiente, es decir, el voltaje de salida de cada rama depende únicamente del estado de los dos transistores de su rama. Y es el convertidor más utilizado en aplicaciones de filtrado activo de potencia a nivel industrial (Kazmierkowski y Malesani, 1998).

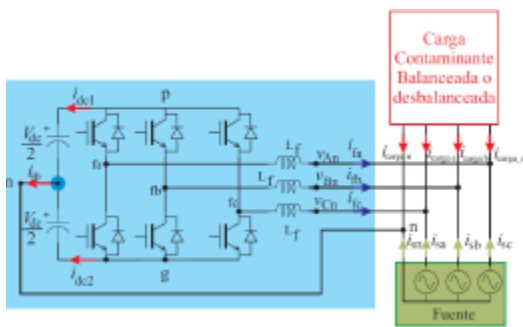


Fig. 3. Convertidor como Inversor VSI con condensador repartido. Conectado en paralelo, con carga y sistema trifásico de 4 hilos

### 2.4 Sistema de control del FAP

El sistema de control de un FAP se encarga de determinar las corrientes de referencia que el FAP debe inyectar en la red. A través de la referencias se debe conseguir la compensación de las corrientes solicitadas por la carga, y el mantenimiento de las condiciones adecuadas de operación del FAP. Normalmente el sistema de control del FAP consta de dos lazos de regulación con funciones claramente diferenciadas (Simona *et al.*, 1998).

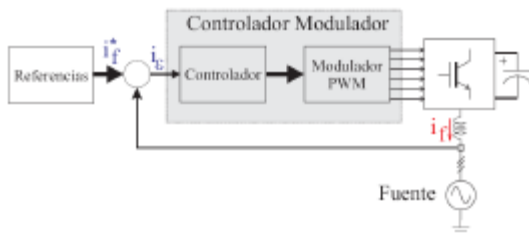
El lazo interno de control determina que componentes de la corriente debe ser compensada, normalmente se aplica alguna de las teorías de potencia instantánea. Aplicar una teoría de potencia instantánea para lograr una compensación consiste en calcular las diferentes componentes de potencia instantánea demandadas por la carga, separar aquellas componentes que son entregadas por la fuente y las deben ser entregadas por el FAP. Las referencias de corriente de compensación se obtienen mediante la correspondiente transformación, de potencia a corriente, claro está de las componentes previamente separadas (Akagi *et al.*, 1984). Adicional al lazo de control principal, es necesario un lazo de control secundario que se encarga de mantener el voltaje absoluto del bus de DC entorno a un valor establecido como referencia. El lazo exterior de control modifica las referencias de corriente de compensación, variando el valor medio de la potencia activa instantánea desarrollada por el FAP, y consiguiendo regular el voltaje absoluto del bus de continua.

En condiciones estacionarias, el flujo de potencia activa en el FAP es constante, pero ante transitorios, ocasionado por variaciones de potencia activa de la carga, el lazo de control interno, tendrá que detectar las nuevas componentes de corriente de la carga que deben ser compensadas por el FAP. Este proceso lleva un cierto tiempo de retardo asociado a la dinámica propia del lazo; implicando que la potencia activa desarrollada por el FAP en ese instante sea errada, dando lugar a una caída en el voltaje de DC del convertidor. Bajo esta situación el lazo de control externo entra en acción para eliminar esta variación en el voltaje de DC. Obtener una expresión analítica para el proceso de compensación explicado anteriormente (dinámica de voltaje de DC) resulta sumamente complicado dado su comportamiento no lineal.

## 2.5 Control de Corriente

El control de corriente del FAP tiene como objetivo conseguir que las corrientes de salida sigan las referencias aportadas a él (ver Fig. 4.). El control de la corriente de inyección de un FAP se puede plantear de forma no lineal, o realizar una aproximación. Dado que los semiconductores de potencia operan a muy alta frecuencia en comparación con las señales aportadas como referencia, es posible realizar una linealización a baja frecuencia. Independientemente de la técnica de control utilizada y suponiendo que no existe filtro a la salida del FAP, la corriente inyectada en la red tendrá un rizado de alta frecuencia superpuesto a la onda de baja frecuencia aportada como referencia.

Existen dos tendencias de controladores de corriente los lineales y los no lineales. Los controladores lineales normalmente utilizan una modulación PWM (PWM - *Pulse Width Modulation*) estándar o modificada, en los cuales la señal portadora proveniente de un regulador lineal que se compara con una moduladora triangular en el modulador (Brod y Novotny, 1985), para obtener la variación en los anchos de pulso de las señales de activación de los interruptores del convertidor. En aplicaciones del FAP, el regulador lineal más utilizado es el Proporcional-Integral (PI) (ver Fig. 5a y 5b) o en su defecto el proporcional (P) con prealimentación (ver Fig. 5c y 5d).



*Fig. 4. Esquema Simplificado del Control de Corriente Trifásico en un FAP*

En cuanto a los controladores no lineales de corriente, el regulador y el modulador se encuentran integrados, la acción de compensación o señal de control y modulación es propia del esquema de control, dentro de estas técnicas se destacan el control por histéresis de corriente y el control por modos deslizantes (Kawabata, *et al.*, 1990; Kawamura y Hoft, 1984; Radulovic y Sabanovic, 1994).

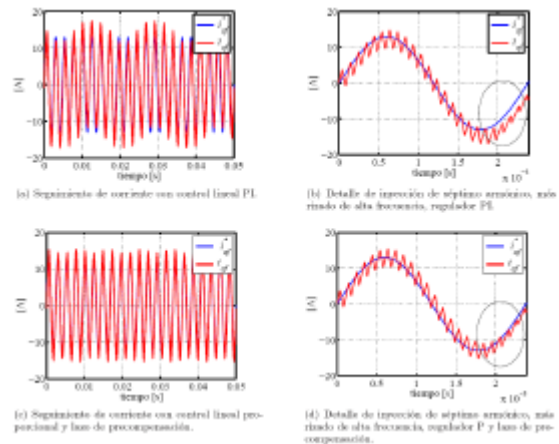


Fig. 5. Referencia de corriente y corriente inyectada, para un séptimo amónico con controlador lineal de corriente

### 3. DISEÑO FAP

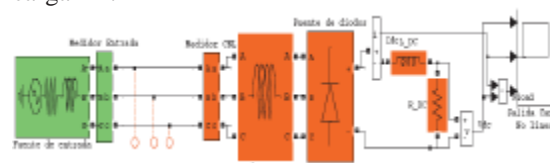
El diseñar un FAP como el de la Fig. 2 para cualquier tipo de carga no lineal, resulta ser una labor muy dispendiosa debido a la variedad de cargas contaminantes y a las formas de onda de corriente en exceso complicadas. Para solucionar este inconveniente se desarrollan los siguientes apartados, donde se describen algunas aproximaciones y un método para el diseño de filtros activos de potencia en paralelo.

Un filtro activo tiene una serie de elementos constitutivos que determinan las condiciones de operación y rendimiento del filtro. Las diferentes aproximaciones que se exponen nacen de la facilidad para realizar diseños, reduciendo la complejidad de otro tipo de análisis sin afectar la confiabilidad de la operación final de los dispositivos. El método para diseñar una FAP se puede dividir en:

- Descripción del tipo de carga a compensar.
- Diseño del convertidor.

### 3.1 Carga a compensar

En la Fig. 6 se observa la conexión de la carga no lineal y la fuente de alimentación. Como carga se ha utilizado un rectificador trifásico en puente con carga RL.



*Fig. 6. Sistema de potencia, fuente-carga no lineal. Utilizando PowerSym de Matlab®*

Los valores de cada uno de los elementos de la Fig. 6, se resumen en la Tabla 1. En la Fig. 7 se observa la corriente fundamental, la corriente de la carga y la corriente no activa.

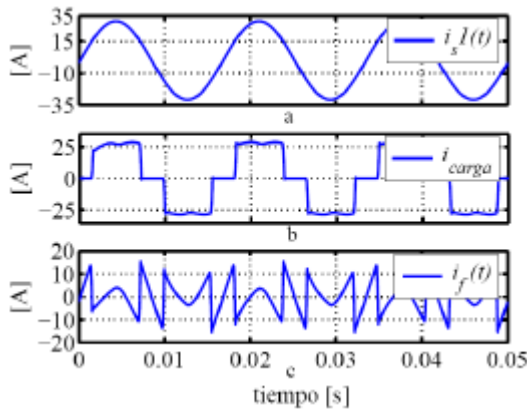


Fig 7. Componentes de corriente. a) Fundamental de la fuente. b) Carga. c) Corriente no activa, que debe ser entregada por el FAP

### 3.2 Diseño del Convertidor

Para dimensionar la cantidad de potencia en VA, se realiza un análisis preliminar de la potencia activa requerida por la carga no lineal, a partir de ésta se determina la magnitud de la componente fundamental de entrada a la carga no lineal. Con dicha amplitud y el ángulo del factor de desplazamiento de la fundamental se realiza el cálculo de la corriente de compensación. Se determina el valor efectivo (rms) de la corriente de compensación gracias a la propiedad de ortogonalidad que existe entre la corriente fundamental y las demás componentes de corriente. De otro lado se determina el voltaje a la entrada del convertidor, por último se determina la potencia “aparente” de entrada al FAP.

Tabla 1: Valores de los elementos de la fuente y la carga no lineal

Carga no Lineal (Rectificador Trifásico)		
Elemento	Valor	Descripción
$V_s$	120 V	Fuente Trifásica de entrada (rms)
$L_s$	76 $\mu$ H	Inductancia de la fuente
$R_s$	30 m $\Omega$	Resistencia de la red
$L_{carga}$	1 mH	Inductancia entrada rectificador
$R_{forward}$	1 m $\Omega$	Resistencia de encendido Rectificador
$L_{DC}$	20 mH	Inductancia del lado de DC
$R_{DC}$	10 $\Omega$	Resistencia de carga de DC
$P_{out}$	7243 W	Potencia de salida DC
$V_{dc}$	271.7 V	Voltaje de salida lado DC
$I_{dc}$	26.64 A	Corriente de salida lado DC
$V_{ll}$	207.8 V	Voltaje de línea a línea (rms)
$i_p$	21.75 A	Corriente de entrada al rectificador (medidor CSL)
$i_1$	20.98 A	Corriente Fundamental DE entrada al rectificador (rms)
$\phi_1$	-14.24 grados	ángulo de retraso de la corriente fundamental
S	7830 VA	Potencia aparente a la entrada del rectificador

Para el diseño del filtro activo de potencia con convertidor TLSC, se utiliza un modelo simplificado de cada una de las ramas de conmutación. Ver Fig. 8.

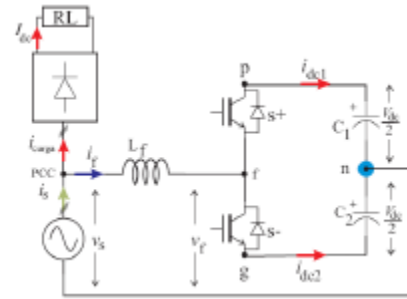


Fig. 8 Una rama del convertidor VSI en topología TLSC

### 3.2 Selección del Voltaje de DC

El voltaje de DC en asocio con las funciones de conmutación del inversor son las variables de control que hacen que la corriente entregada por el FAP siga la referencia. Por consiguiente el voltaje en el lado de DC debe ser mayor al pico de voltaje del lado de AC (vf) del FAP. Para la elección del voltaje de DC se asumen las siguientes condiciones de diseño:

- Variación del voltaje de alimentación en un 20 %. Es decir  $V_s = 120 \pm 20\% V_{rms}$
- Índice de modulación de amplitud  $m_a = 0.8$ .

Para las máximas condiciones de diseño el voltaje de DC se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$V_{dc(FAP)} = \frac{2}{m_a} \hat{v}_f$$

$$V_{dc(FAP)} = \frac{2}{0.8} \sqrt{\frac{2}{3}} (207.8 + 20\%) = 510 V_{cd}$$

El voltaje de DC del FAP, debe tener un nivel lo suficientemente alto como para considerar los picos de voltaje en la conmutación. En casos prácticos de diseño el voltaje de DC se selecciona despreciando los efectos debidos a la conmutación, pero precisamente en las conmutaciones es donde se presentan los mayores picos de voltaje. Si el voltaje de DC es menor al nivel de voltaje requerido en los instantes de conmutación, el FAP perderá el control en el seguimiento de la corriente de referencia y éste se repetirá en todos los instantes de conmutación siguientes, originando huecos en la corriente de la fuente. El pico de voltaje depende del valor de la inductancia, si se aumenta su valor, el pico de voltaje, también aumenta. Lo que se convierte en otra restricción en la selección del valor de la inductancia.



### 3.3 Cálculo de la inductancia de enlace (reactor)

La inductancia de enlace o también conocida como reactor, es el elemento que se coloca entre el inversor VSI y la red de suministro, para permitir que el filtro activo inyecte la corriente de compensación al sistema, es decir el intercambio de energía entre la fuente y el FAP. El valor de la inductancia es crítico pues de este depende el desempeño del FAP, en lo que se refiere al seguimiento de las corrientes de referencia y la relación con el valor de la energía almacenada en el condensador del lado de DC. Los criterios para el dimensionamiento de la inductancia son:

- La máxima corriente instantánea entrega por el filtro: Para una carga específica ver Tabla 1, y según la Fig. 7 la máxima corriente suministrada por el filtro es  $i_f = 17.6$  A
- La pendiente de la onda de corriente: que circula por la inductancia debe ser menor o igual a la pendiente de la onda moduladora, para el caso de un controlador lineal; la pendiente de la onda triangular resulta:  $\lambda = 4V_r f_i$ . Donde  $V_r$  es el valor pico de la rampa,  $f_i$  es la frecuencia de la moduladora triangular.
- Filtro para la corriente de salida del FAP. Debido al control por PWM la corriente de salida del FAP contiene rizado de alta frecuencia, el cual es necesario eliminarlo. Si se selecciona una inductancia muy grande (por ejemplo: 10 mH) de forma que se elimine el rizado de alta frecuencia, el seguimiento de las corrientes de referencia se ve afectado, pues el voltaje pico en el terminal  $f$  de la Fig. 8 debe ser muy elevado, implicando que el voltaje del lado de DC sea mucho mayor, para forzar los cambios de corriente en la inductancia; con lo que se desmejora la respuesta dinámica del sistema.
- Voltaje en la inductancia. El voltaje de caída en los terminales del reactor debe ser lo menor posible, como condición de diseño se recomienda que este valor para la componente fundamental no sea mayor a un 2% del voltaje rms de fase.

Se asume que el inversor por VSI está operando en lazo cerrado y sin carga, se desprecia las pérdidas y el rizado de alta frecuencia en la inductancia y se toma como parámetro de diseño el pico del rizado de corriente por tanto el valor de la inductancia está dado por la siguiente ecuación:

$$L_f = \frac{V_u}{6\sqrt{2}f_s \hat{i}_{\text{rizado}}} = 2.448 \text{ mH} \approx 2.45 \text{ mH}$$

Donde  $f_s = 10$  kHz es la frecuencia de conmutación; con un rizado pico  $i_{\text{rizado}} = 1$  A, que

corresponde a un 6.5% del pico de corriente que entrega el FAP.

Tabla 2. Componentes FAP

Descripción	Elemento	Valor
Entrada Filtro	$L_{in}$	750 $\mu\text{H}$
	$R_{in}$	100 $\text{m}\Omega$
	$L_h$	109 $\mu\text{H}$
	$R_h$	8 $\text{m}\Omega$
	$C_h$	2,2 $\mu\text{F}$
Inductancia de acople	$L_f$	2,44 $\text{mH}$
Pérdidas de acople	$R_f$	400 $\text{m}\Omega$
Condensador del lado de DC $V_{p0}$	$C_{1\text{FAP}}$	1100 $\mu\text{F}$
Condensador del lado de DC $V_{n0}$	$C_{2\text{FAP}}$	1100 $\mu\text{F}$

### 3.4 Cálculo del Condensador de DC

Para dimensionar el condensador de DC del FAP, se toma como variable de diseño el voltaje de rizado sobre el condensador. El factor de rizado se define como la amplitud de las oscilaciones permitidas en el nivel de voltaje de DC; Si la amplitud del rizado en el lado de DC es muy grande se introduce componentes armónicas no deseadas en la corriente de inyección lo que perjudica en últimas la operación del convertidor. Por tanto se selecciona un pico de rizado máximo de 2 V, con lo que se tiene la siguiente expresión:

$$r_{dc} = \frac{\Delta v_{dc}}{V_{dc}} = \frac{2}{510} \approx 0.3\%$$

Un inconveniente en la selección de la amplitud del rizado es el desbalance en el voltaje de DC de cada uno de los condensadores, debido la configuración TLSC. Este desbalance ocasiona circulación de corriente de secuencia homopolar por la red. El cálculo del valor del condensador se hace con base en el pico de corriente que entra al FAP y que a su vez deben soportar los interruptores del convertidor; logrando la expresión:

$$C_{FAP} = \frac{P_{out}}{V_u} \frac{\cos(\theta_1 - \theta/3)}{\sqrt{6}r_{cd}V_{cd(FAP)}f_s} \approx 500 \text{ mF}$$

### 3.5 Filtro de Entrada

Adicional a la inductancia de enlace es necesario instalar un filtro de entrada AC para reducir el rizado de corriente de alta frecuencia y la distorsión de voltaje en el punto de conexión común. Para eliminar el rizado de alta frecuencia ocasionado por la conmutación del FAP, se diseña un filtro serie RLC sintonizado a 10 KHz, conectado en paralelo con el FAP.



Tabla 3. Parámetros del Modelo  $LM_{pq}$ 

Controlador	$LM_{pq}$	
Control corriente de inyección FAP	$K_p$	0.23
Control de voltaje lado DC del FAP	$K_p$	80
	$K_i$	20
	$V_{dc}^*$	510 V
FPB	orden	5
	$f_c$	120 Hz

Debido a la inductancia de entrada  $L_{in}$ , el valor del condensador se escoge de forma que la resonancia con dicha inductancia sea superior al armónico 50 de la frecuencia fundamental. Para lograr una buena atenuación de la componente de corriente de alta frecuencia inyectada por el FAP se ha tomado un factor de atenuación  $k_{ati} = 6.5$  (Bernet *et al.* 2002). El valor de  $L_h$  se obtiene a partir de la frecuencia de conmutación:

$$C_h = \frac{k_{ati}}{4p^2 f_s^2 L_{in}} = 2.2 \text{ mF}$$

Para eliminar los huecos en el voltaje del PCC, según el estándar alemán VDE (*Association for Electrical, Electronic & Information Technologies*) se recomienda instalar una inductancia de entrada entre el punto de conexión y el dispositivo a conectarse, en este caso el FAP. El valor de la inductancia esta dado por:

$$L_{in} = \frac{1-d}{d} L_f$$

Se observa que ésta depende de reactor del FAP ( $L_f$ ) (Mohan, 2003). Para un valor  $d=0.23$ , sugerido por el estándar IEEE-519 aplicado a sistemas generales, resulta una inductancia  $L_{in}=750 \mu H$ .

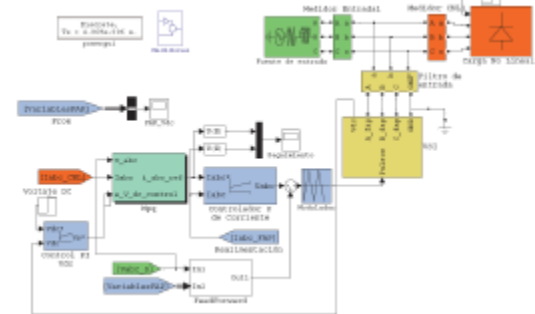
#### 4. SIMULACION Y RESULTADOS

A continuación se presenta un modelo desarrollado de un filtro activo en paralelo para la eliminación de armónicos en sistemas de potencia. Para todas las simulaciones se utilizaron los valores de la fuente-carga no lineal y el FAP establecidos en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente.

##### 4.1 FAP control lineal y cálculo de corrientes $M_{pq}$

El método se ha denominado  $LM_{pq}$ , debido a que se utiliza un controlador lineal para el seguimiento de la corriente de referencia. Y para el cálculo de la corriente de referencia se utilizó la teoría  $p-q$  ( $M_{pq}$ ); Dentro del bloque  $M_{pq}$  se utilizó un filtro pasa bajo

para realizar la implementación de un filtro pasa alto. El bloque  $M_{pq}$  permite calcular las componentes armónicas de la potencia instantánea, las cuales se utilizan para determinar la corriente de compensación. También se incluye un lazo externo de control que mantiene constante el voltaje en el condensador del lado DC del FAP. Los valores asociados a este modelo se pueden observar en la Tabla 3.

Fig. 9 Modelo completo FAP, con control lineal y cálculo de corrientes  $M_{pq}$ . Simulink®

##### 4.2 Descripción de la simulación

La simulación del FAP se realizó en el entorno de Simulink® de Matlab®. Se modela el sistema de potencia, la carga no lineal, y el filtro activo con cada uno de sus bloques internos, ver Fig. 9. El objetivo de estas simulaciones es determinar el buen uso de las consideraciones de diseño aplicados en el FAP. Algunos índices son corrección del factor de potencia, la distorsión armónica total de la corriente entregada por la fuente ( $THDi$ ), el tiempo de respuesta del voltaje del lado de DC FAP, y la potencia “reactiva” generalizada  $q$  (Cardenas, 2008), ésta componente de potencia no corresponde con ninguna de las definiciones convencionales de potencia, bien sea activa, reactiva, no activa etcétera. A continuación se describen las pruebas realizadas.

- Sin variaciones en la corriente de la carga. La prueba está dividida en dos partes. La primera de ellas consiste en observar el comportamiento del FAP, la fuente y el rectificador, todos ellos conectados en un mismo punto (en paralelo) como se observa en la Fig. 10. La segunda consiste en dar inicio a la simulación con la fuente y la carga conectadas, y el FAP desconectado. Luego de transcurridos tres períodos de la onda fundamental, aproximadamente 50 ms, se hace la conexión del FAP al circuito, la respuesta se observa en la Fig. 11. La corriente que circula por el rectificador, tiene un  $THDi = 23.3\%$ . En la Tabla 5, se observan los valores de los índices de desempeño para la prueba realizada.

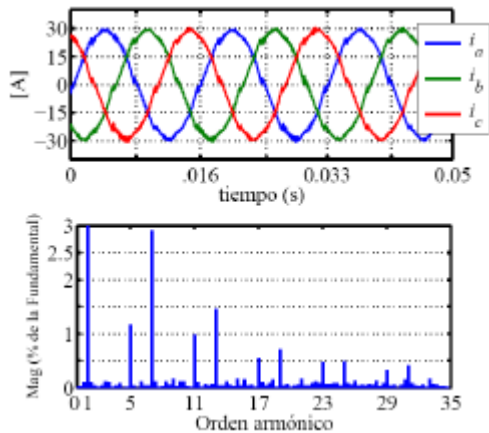


Fig. 10. Corrientes de la fuente, bajo la acción del FAP y conectada a la carga, Contenido armónico. Método LMpq

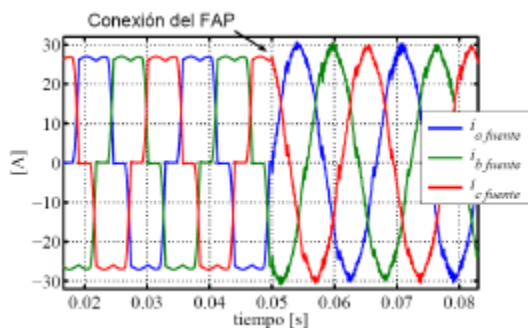


Fig. 11. Conexión del FAP en el Sistema de Potencia

- Con variaciones en la corriente de la carga no lineal: Carga Variable.

La prueba consiste en realizar una variación (escalón) de la corriente de carga en un 30%. Ésta se logra modificando la resistencia de salida del rectificador (carga no lineal). La variación de la corriente de la carga se realiza a los 66,6 ms de iniciada la simulación

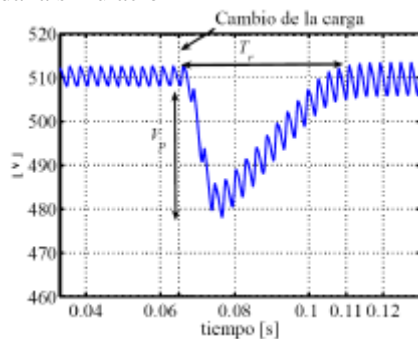


Fig. 12. Respuesta del voltaje en DC del FAP, ante variaciones de la carga a compensar

El objetivo de la prueba planteada es determinar la respuesta dinámica del FAP ante variaciones de la carga no lineal. Se aumenta la corriente de la carga no lineal (rectificador) de 29.5 A pico a 40 A pico. En términos de potencia supone pasar de 7243 W a 9513 W que corresponde a un aumento del 30% de la potencia nominal de la carga, con un nuevo valor  $\phi_l = -17,26$  grados, y pasara a un factor de potencia de 0,95 en atraso.

En la Fig. 12. se observa la respuesta del voltaje absoluto en el lado de DC del FAP, la variación tiene amplitud  $V_p = 30V$  y el tiempo de establecimiento es de  $T_r = 44ms$ , equivalente a tres y medio veces el período de la fundamental. Ver a la derecha de Tabla 5.

Tabla 5. Índices de desempeño para FAP.  
Carga constante y carga variable

	LMpq		LMpq
$THD_i$	3,82 %	$THD_i$	3,46 %
$\eta_i$	0,6952	$\eta_i$	0,699
$\eta_{FP}$	0,9997	$\eta_{FP}$	0,9996
$q$ [VAR]	293,89	$q$ [VAR]	420,51
$i_1$ [A]	28,83	$i_1$ [A]	39,93
		$T_r$	50 ms

## 5. CONCLUSIONES

El método y las consideraciones de diseño se verificaron satisfactoriamente a través de las diferentes simulaciones. Las pruebas realizadas permitieron observar el comportamiento del FAP bajo diferentes condiciones de operación, lo cual confirma, desde el punto de vista de la simulación, que el diseño es confiable.

Los FAP tienen la capacidad de adaptarse a variaciones de las condiciones de la red, así mismo los FAP con convertidor TLSC presentan un control sencillo, debido a que existe un nodo intermedio en el lado de DC, y éste se conecta al terminal de neutro del sistema. Logrando que cada rama del convertidor opere de manera independiente.

## REFERENCIAS

Christopher J., M, y McGranaghan M., F. *Interpretation and analysis of power quality measurements*. IEEE Trans. on Ind. Applicat., 31(6):1363–1379, Nov/Dec.

- Bettega, E. y Fiorina J. (2003). *Cuaderno técnico n° 183 armónicos: rectificadores y compensadores activos*. Cuaderno Técnico 183, Schneider-Electric.
- Collombet, C. y Lupin J-M, y Schonek J. (2003). *Cuaderno técnico No. 152, los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento*. Schneider-Electric.
- Akagi, H. (1995). Trends In Active Power Line Conditioners. IEEE Trans. on Power Electron., 1994, 3, 263-268.
- Akagi, H. (1996). New trends in active filters for power conditioning. IEEE Trans. on Ind. Applicat., 32, 1312-1322
- Rossetto, L. y Tenti, P. (1992). *Using Ac-FedPWM Converters as Instantaneous Reactive Power Compensators*. IEEE Trans. on Power Electron., 7, 224-230.
- Mohan, N. (2003). *Power Electronics and Drives*, New York.
- Malesani, L. y Rossetto, L. and Tenti, P. (1986). *Active filter for reactive power and harmonics compensation*. in Proc. IEEE PESC'86, 1986, pp. 321-330.
- Kazmierkowski M. y Malesani L (1998). *Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey*. IEEE Trans. on Ind. Elect., 45(5):691-700, Oct.
- Akagi H., Kanazawa Y. y Nabae A. (1984). *Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components*. IEEE Trans. on Ind. Applicat., IA-20:625-630, May/June.
- Buso S., Malesani L. y Mattavelli P. (1998). *Comparison of current control techniques for active filter applications*. IEEE Trans. on Ind. Elect., 45(5):722-729, Oct.
- Brod, D. y Novotny, D. (1985). *Current Control Of VSI-PWM Inverters*. IEEE Trans. Ind. App., vol. IA-21, pp. 562-570, July/Aug.
- Holmes, D. y Martin, D. (1996). *Implementation of direct digital predictive current controller for single and three phase voltage source inverters*. in Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 906-913.
- Kawamura, A. and Hoft, R. G. (1984). *Instantaneous feedback controlled PWM inverters with adaptive hysteresis*. IEEE Trans. Ind. App., vol. IA-20, July/Aug.
- Kawabata, T. M., y Yamamoto, Y. (1990). *Dead beat control of three phase PWM inverter*. IEEE Trans. Power Elect., vol. 5, Jan.
- Radulovic, Z. y Sabanovic, A. (1994). *Active filter control using a sliding mode approach*. in Proc. IEEE PESC'94.
- Ponnaluri S. y Vaidyanathan K. (2000). *Generalized system design of voltage source converter*. IEEE IAS 2000 Conferece, Roma(2), Oct.
- Bernet S. y Ponnaluri S. y Teichmann R. (2002). *Design and loss comparison of matrix converters and voltage-source converters for modern ac drives*. IEEE Trans. on Ind. Elect., 49(2):304-314, Apr.
- Cardenas P. (2008). *Diseño y Simulación de un filtro activo para la eliminación de armónicos en sistemas de potencia*. MSc. Tesis, Universidad Nacional de Colombia.

**THE TMR-1. A TELEOPERATED MOBILE ROBOT****El TMR-1. UN ROBOT MOVIL TELEOPERADO****Ing. Melvin Andrés González Pino, PhD. Cristhian Manuel Durán Acevedo****Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 156

E-mail: {ingmelvin, cmduran}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** This paper deals with the design and construction of a teleoperate robot TMR-1, which is a prototype developed for the care of high-risk situations in hostile environments. The robot can be controlled at a safe distance from a central command through of video cameras system. Consists of a modular system and configurable depending on the need, consisting of two manipulator arms, clamps grip and a control system that allows great maneuverability especially in enclosed spaces, through of a system of wheels with traction differential. This robot could perform tasks such as transport, manipulate, pushing and dragging objects, as well as conducting surveys of land, emergency or natural disaster, explosive ordnance disposal. The equipment can be updated through the location of other devices sensors.

**Resumen:** El artículo consiste en el diseño y construcción de un Robot TMR-1 teleoperado, el cual es un prototipo desarrollado para la atención de situaciones de alto riesgo en ambientes hostiles. El robot puede ser controlado a una distancia segura y desde una central de mando a través de un sistema de cámaras de video. Consiste de un sistema modular y configurable dependiendo de la necesidad y consta de dos brazos manipuladores con pinzas de agarre. El sistema de control permite una gran maniobrabilidad sobre todo en espacios cerrados a través de un sistema de ruedas con tracción diferencial. Este Robot podría realizar tareas como transportar, manipular, empujar y arrastrar objetos, así como realizar reconocimientos de terreno o situación de emergencia o desastre naturales, desactivación de artefactos explosivos. El equipo puede ser actualizado a través de la ubicación de otros dispositivos sensores.

**Keywords:** Robotics, Teleoperate Mobile Robot, Manipulator arm, Ground exploration.

**1. INTRODUCCION**

A medida que la robótica avanza el hombre encuentra cada vez mas aplicaciones para los robots, cada vez son más frecuentes situaciones en donde se requiere la manipulación de sustancias peligrosas, tales como: Sustancias químicas, biológicas, explosivas o radioactivas; o en ciertos

casos el reconocimiento de ambientes hostiles o cubrimiento de zonas de alto riesgo de desastre.

En este artículo se describe el prototipo TMR1, un robot móvil desarrollado en la Universidad de Pamplona y único en la región, para realizar tareas de alto riesgo en el transporte y neutralización de artefactos explosivos improvisados. Estas tareas



son conocidas en el ámbito militar como operaciones EOD (*Explosive Ordnance Disposal*), además de tareas de atención de emergencias y rescate.

Desafortunadamente Colombia es el único país del continente que tiene un aumento permanente de víctimas debido a la ubicación estratégica de minas antipersonales por parte de los grupos terroristas. Las Fuerzas Militares (Policía Nacional), actualmente cuentan con robots importados de primera generación, como es el caso del MK7 y de segunda generación como el ANDROS, cuyo costo hoy supera los 1000 millones de pesos (500.000 Dólares USD) cada uno. Actualmente existen cuatro unidades distribuidas en igual número de ciudades, ofreciendo poca cobertura sobre el territorio nacional, estas unidades no están diseñadas específicamente para el tipo de situaciones que se presentan en Colombia, debido a que generalmente los artefactos explosivos son elaborados de forma artesanal.

Hoy en día estos escuadrones cuentan con una dotación de equipos y herramientas muy limitadas para atender estos casos de emergencia, y en muchos casos esta dotación no es la adecuada para manejar de forma óptima la situación de emergencia (Ver figura 1). Esto debido en parte a que la mayoría de sus equipos son donados por gobiernos extranjeros, en donde las características de sus conflictos son muy distintas y por esto los parámetros de diseño y funcionalidad difieren a los requeridos en el país.



Fig. 1. Desactivación Manual de Minas Terrestres

El Robot desarrollado en este trabajo es muy similar tecnológicamente a los que se encuentran en el mercado, entre los que se destacan a nivel mundial los equipos de segunda y tercera generación especializados en este tipo de aplicaciones: Como el ALLEN-VANGUARD

MK2, ANDROS, PACKBOT, SWORD-TALON, pero todos ellos con altísimos costos.

## 2. DESCRIPCION DEL EQUIPO

### 2.1. Estructura Mecánica

El prototipo TMR1 es un sistema modular desarmable, básicamente está formado por un chasis, un sistema de tracción, dos brazos manipuladores intercambiables, una torre de cámaras y un par de orugas intercambiables.

Como se observa en la figura 2, esta configuración facilita su transporte de manera que este puede ser armado o desarmado fácilmente por una sola persona, y en menos de 2 minutos; está es una de las características más importantes para la atención de emergencias.

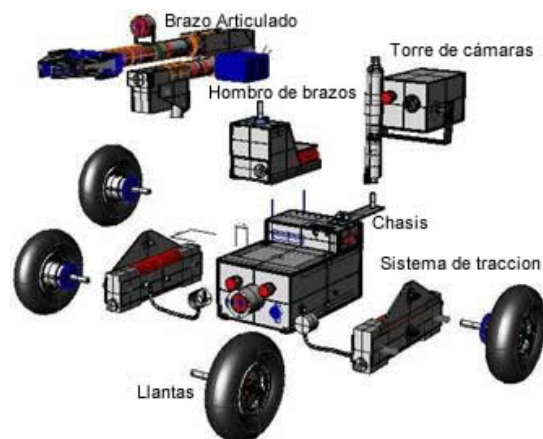


Fig. 2. Diagrama de Bloques modulares del TMR1

Es importante destacar que en su mayoría todas las partes que componen el TMR1 se fabricaron de aluminio, a excepción de algunas partes que requieren mayor resistencia como sistemas de tracción y algunas articulaciones de los brazos manipuladores. El uso predominante de aluminio tiene por objeto reducir en lo posible el peso del equipo (70 Kg aproximadamente), esto aumenta su versatilidad, por que permite una mayor portabilidad y duración de la carga de baterías, característica muy importante en los robots EOD de tercera generación.

### 2.2. Chasis

El chasis cuenta con una arquitectura en forma de caja, está construido en lámina de aluminio de 6mm

de espesor y alberga los sistemas electrónicos de control, baterías y equipos de comunicación (Ej: Las antenas) y sirve como soporte al sistema de tracción diferencial, el hombro de los brazos, así como la torre de cámaras. Dependiendo de la configuración se puede modificar la altura, subiendo o bajando el centro de gravedad del robot.

En la parte del frente tiene una cámara a color con dos luces acopladas y los correspondientes conectores de potencia para el sistema de tracción; en la parte superior cuenta con un compartimento independiente para aislar en lo posible a los equipos de comunicación del ruido eléctrico, de los motores y etapas de potencia. En la parte trasera se encuentran los conectores de potencia para el sistema de tracción, un interruptor para seleccionar la fuente de potencia, una entrada de potencia de la fuente externa, una cámara tipo bala, y los conectores de los buses de potencia y datos para los brazos, por último una torre de cámaras además del bus de video.

### 2.3. Sistema de tracción diferencial y llantas

Se compone de cuatro llantas con motores de 400W cada uno para un total de 1.6 KW, que son movidas en parejas de izquierda y derecha. Cada motor esta acoplado a una etapa primaria de reducción con un sistema satelital de engranajes, el eje de salida está a su vez acoplado a la segunda etapa de reducción (Tornillo sin fin con corona de bronce), con rodamientos que le permite soportar hasta 100 Kg de peso adicional (Ver figura 3).

El sistema de tracción le permite al robot TMR1 desplazarse a una velocidad de 2 Km/h, proporcionándole un alto grado de maniobrabilidad en espacios cerrados. Gracias a ser un sistema modular configurable, el sistema de tracción puede ser acoplado en dos formas, la primera es una configuración mas elevada del suelo y mas angosta, que le permite maniobrar en espacios más reducidos pero reduce la capacidad de carga; la segunda forma es más ancha aumentando la base de apoyo y bajando el centro de gravedad del equipo, permitiéndole mayor capacidad de carga y estabilidad.



Fig. 3. Configuraciones del sistema de tracción diferencial

El juego de llantas inflables cuenta con un sistema de fácil intercambio para un rápido remplazo en caso de avería. El control de las ruedas permite el giro del robot en un radio de cero, es decir puede girar completamente sobre su sitio, esto se logra invirtiendo el giro de las ruedas derechas e izquierdas por separado.

### 2.4. Brazos Manipuladores y Pinzas de Sujeción:

Debido a la diversidad de tareas específicas que debe adelantar el robot, se optó por diseñar y construir dos brazos con diferente configuración mecánica.

- *Brazo telescópico:* Tal y como se observa en la figura 4, el brazo fue diseñado para labores más sencillas como levantar y transportar un objeto sospechoso en espacios abiertos de una forma rápida y sencilla; cuenta con 4 grados de libertad y permite una capacidad de carga de hasta 15 Kg y un giro de pinza de 720 grados con una aproximación telescópica muy útil al momento de sujetar un objeto.



Fig. 4. Brazo telescópico con sensor de metales

- *Brazo articulado:* Tiene la capacidad de realizar movimientos más complejos, también proporciona un amplio rango de alcance (hasta 2m de altura), y por esta razón tiene una capacidad de carga baja cuando el brazo está



completamente extendido, obligando al operador a transportar cargas pesadas lo más cerca posible al chasis para evitar que el robot se voltee. Otra tarea que se puede realizar con este brazo es la inspección por debajo de los vehículos (Ver ejemplo de la figura 5), en busca de cargas explosivas o cableados sospechosos (típicos en los carro-bombas), ya que su forma le permite plegarse sobre el mismo.



Fig. 5. Brazo Articulado inspeccionando vehículo

En los dos tipos de brazos se usaron motores de 200W acoplados a etapas de reducción con engranajes satelitales, ya que se optó por un sistema de control descentralizado. Cada brazo tiene sus propios circuitos de control, apostados en pequeños compartimentos, donde llegan los cableados correspondientes a los buces de potencia y datos de control, para dar la potencia apropiada a cada motor. Cada brazo cuenta con pinzas idénticas con sistema de reducción de alta relación, dándole una gran fuerza de sujeción mayor a 100 Kg. A partir de un sistema de dedos paralelos y una cubierta de caucho especial, le permiten al robot sujetar objetos pesados, reduciendo el riesgo que se suelten por causa de la vibración al momento de transportarlo. Además cada brazo contiene una cámara de video que le permite al operador manipular con precisión el objeto sospechoso.

### 2.5. Torre de Cámaras

La torre de cámaras es uno de los elementos más importantes al momento de la manipulación o inspección de un objeto, está ubicada estratégicamente y también es llamada cámara de ataque. Le permite al operador tener un punto de vista adecuado que debe complementarse con la imagen recibida por la cámara del brazo, ya que al recibir imágenes en 2 dimensiones es muy difícil calcular la profundidad del espacio de trabajo, y

esto podría ocasionar errores o accidentes. La cámara tiene dos grados de libertad, 300 grados en la horizontal y 90 grados en la vertical (PT pan y til). En una versión futura se incluirá una cámara con zoom óptico (PTZ) más compacta. Complementando la función de la cámara de ataque se encuentra una lámpara de LED's, de bajo consumo. La torre de cámaras puede ser acoplada en 3 formas, la primera sobre el brazo telescópico de manera que se mueve en conjunto con el brazo en el plano horizontal, la segunda es la parte trasera del robot sobre una extensión mecánica plegable que la aleja del brazo articulado, proporcionándole mayor espacio de trabajo (Ver figura 6), y la tercera es en el centro del chasis en lugar de los brazos manipuladores.



Fig. 6. Torre de Cámaras

### 2.6. Sistema de Orugas Intercambiables

Por la dificultad para subir escaleras con las ruedas obligo al diseño de un sistema de orugas intercambiables (Aun en desarrollo, Ver figura 7), que permitieran además desplazarse en terrenos irregulares de una manera más estable.



Fig. 7. Sistema de Orugas Intercambiables

El sistema de oruga diferencial trabaja de forma similar a las ruedas, y está conformado por una cadena unida a una serie de placas en aluminio que a su vez tienen tacos de cauchos especiales; esto le

permite obtener mayor agarre en superficies inclinadas. Al mismo tiempo puede absorber en cierto grado la vibración producida al momento del desplazamiento.

### 2.7. *Sistemas Electrónicos*

El sistema electrónico del TMR1 está formado por una serie de módulos separados, cada uno con un microcontrolador encargado de recibir las órdenes, y controlar los diferentes motores. Todos los módulos están conectados a los tres buses principales, el de potencia, bus de alimentación y el bus de datos. El bus de potencia se encarga de llevar la suficiente cantidad de corriente que requieren los motores de desplazamiento, y las articulaciones de los brazos; el bus suministra un voltaje de 12V.

El bus de alimentación transporta 12V a los circuitos, cámaras, transmisor de video y el equipo de comunicaciones. A su vez está aislado eléctricamente del bus de potencia, debido a que es necesario por los grandes picos de corriente (hasta 80A) que generan los diferentes motores.

El bus de datos es el encargado de llevar las ordenes recibidas por el equipo de comunicaciones, y recibe los datos enviados desde la central de control (Radio Modem).

### 2.8. *Cámaras de Video*

Las imágenes de video son las señales de retroalimentación en el sistema de control del robot, el TMR1 cuenta con 5 cámaras distribuidas así:

- *Cámara 1*, está ubicada en la parte frontal del chasis, también llamada cámara de navegación, tiene como función facilitarle al operador el desplazamiento del robot.
- *Cámara 2*, ubicada en la parte trasera del chasis, y es muy útil para evitar colisiones cuando se maniobra en espacios reducidos.
- *Cámaras 3 y 4*, están montadas en cada uno de los brazos manipuladores, muestran de manera detallada las pinzas y el objeto que se va a manipular.
- *Cámara 5*, llamada también cámara de ataque, ubicada estratégicamente le da la libertad de ver el alrededor del robot con dos grados de libertad (PT).

Todas las cámaras trabajan a 12V con salida de video NTSC estándar de 30 cuadros por segundo con sensor CCD de 1/3", 3.5 mm focal y 320

líneas de resolución; envían imágenes a color cuando hay suficiente luz, en caso contrario pasan a trabajar en modo de visión nocturna, encendiendo una serie de LED's infrarrojos que le permiten trabajar en completa oscuridad. A demás pueden trabajar en la intemperie si se requiere, ya que están encapsuladas herméticamente.

Todas las cámaras están conectadas a un circuito secuenciador controlado, el cual selecciona la señal deseada por el operador, ya que el transmisor de video solo puede transmitir una señal de video a la vez.

Para mejorar la visibilidad del operador el robot cuenta con varias fuentes de luz, estas luces están ubicadas al frente del chasis (2 luces) y en la torre de cámaras.

### 2.9. *Equipos de comunicación*

EL equipo de transmisión de video es de 2.4 GHz, y envía la señal de la cámara seleccionada hasta la central de control. Por otra parte un radio modem permite una comunicación full dúplex, con velocidades de transmisión de 9600 baudios, y se envían las ordenes desde el la central de control hacia el robot. En un futuro se planea usar la comunicación en sentido contrario para enviar información de sensores o herramientas avanzadas; el alcance del enlace de radio está por encima de los 500 metros en campo abierto con línea de vista, y 200 metros en zonas urbanas, permitiendo mantener el control del robot desde una distancia segura

### 2.10. *Baterías y fuentes alternas de energía*

El robot cuenta con un juego de 3 baterías separadas para evitar interferencias y problemas de ruido en los componentes más sensibles. La primera batería es seca y de plomo con 12V y 17.2 Ah, que proporciona la mayor potencia para alimentar los motores de desplazamiento y brazos; las demás son paquetes de pilas de Ni Cd de 12V y 1.3 Ah que suministran energía a los circuitos de control, cámaras y equipos de comunicación.

La autonomía del TMR1 con las baterías completamente cargadas es de 1 hora aproximadamente, un tiempo relativamente corto para el tipo de misiones que debe realizar, por esta razón se piensa en reemplazar las baterías actuales por baterías de alto rendimiento y las cuales son más livianas (Ej: Celdas de Ion Litio).

La tarea de desminado terrestre puede abarcar aéreas muy grandes de terreno, por esto se desarrolló un sistema generador de electricidad alterno a las baterías, básicamente consiste en una planta eléctrica pequeña de 1 KW, modificada para proporcionar 12V de corriente DC, y así mover los diferentes motores. Con el impulso a gasolina el generador permite el trabajo continuo del robot por periodos de tiempo más largos (Superior a 6 horas continuas de trabajo).

## 2.11. Central de Control

La central de control consiste en una valija muy pequeña y fácil de transportar. Es hecha en plástico resistente y en ella se encuentra una pantalla a color LCD TFT de 7 pulgadas, que permiten al operador observar las imágenes de las cámaras de video. A través de varios mandos analógicos (tipo *joystick*) se tiene como función activar los motores del robot de forma independiente y simultanea si se requiere; además una serie de pulsadores permiten seleccionar la cámara, encender las luces y abrir o cerrar las pinzas.



Fig. 8. Maleta de control

La maleta está alimentada por una batería de Ni Cd de 12V y 1.3 Ah. Ofrece un tiempo de trabajo superior a 3 horas, y tiene en su interior los equipos de transmisión de datos y el receptor de video con un par de antenas internas, y una salida de video RCA.

## 2.12. Herramientas y Sensores de Detección:

Gracias al sistema modular y a los buses de datos y de potencia, es posible desarrollar herramientas y sensores especializados para las labores de EOD.

A continuación describiremos los sensores más importantes usados por los escuadrones de técnicos antiexplosivos de las fuerzas militares:

### 2.12.1 Sensores

*Detector de metales (en desarrollo):* son la herramienta más importante en la detección de artefactos explosivos, esto es debido a que la mayoría de las minas contienen fragmentos de metales ferro-magnéticos que causan variaciones en campo magnético, generado por el sensor (efecto Hall).

- *Detector de minas por radar:* algunas minas están construidas con materiales plásticos y en vez de metralla usan fragmentos de vidrio, algunas veces con sustancias tóxicas o infecciosas, por esta razón se han desarrollado sensores que usan ondas de radio que penetran el suelo, y al rebotar en materiales de diferente densidad generan un patrón de la sección transversal del terreno, algo parecido a una ecografía médica.
- *Sensores de gases (Caso de estudio):* Las sustancias explosivas usadas en las minas y demás artefactos son en su mayoría volátiles que desprenden un rastro de olor o aroma característico que puede ser detectado usando una matriz de sensores de gases: Actualmente se usan perros entrenados para esta función pero que en muchos casos son engañados. La función de este sensor es hacer varias mediciones de la concentración de los olores emitidos por los explosivos en el aire y tratar de calcular un gradiente espacial que nos indique hacia qué dirección crece la concentración del rastro químico, llevándonos hasta la fuente, en este caso la mina.
- *Dispositivos de rayos X:* Permite analizar el interior de un objeto o paquete, sin la necesidad de realizar un contacto físico o manipulación que pudiera activar la carga explosiva, usa equipos muy similares a los usados en laboratorios de radiología de hospitales.

## 3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez terminado el prototipo se inició una serie de pruebas en campo abierto donde básicamente se evaluó su desempeño. A partir de los resultados se obtuvieron las ventajas y desventajas del equipo:

*Ventajas:*

- Fácil de transportar en vehículos pequeños.
- Facilidad de intercambio de sus diferentes partes como brazos, llantas y sistema de oruga.
- Ofrece un alto grado de maniobrabilidad en espacios reducidos gracias a los mandos de control y sistema de tracción diferencial.
- Tiene gran capacidad de arrastrar objetos pesados.
- El brazo articulado permite hacer una inspección de vehículo fácilmente.
- La torre de cámaras nos permite obtener un amplio campo visual alrededor del robot
- Gracias a su gran fuerza las pinzas manipuladoras dan un alto grado de seguridad al agarre.
- Flexibilidad de incorporación de una gama completa de sensores.

*Desventajas:*

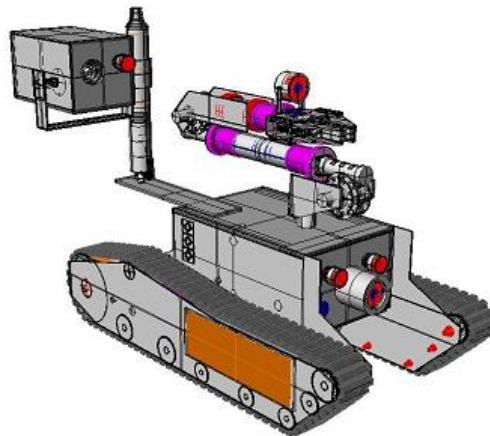
- A pesar de que el Radio Modem puede comunicarse a más de 500 metros, la distancia de control del robot está limitada por el corto alcance del transmisor de video cercano a los 200 metros.
- En el momento de extender completamente el brazo articulado o levantar cargas pesadas, se presenta cierto grado de inestabilidad del robot que se puede reducir un poco aumentando la presión del aire de los neumáticos pero sacrificando un poco de agarre al terreno.
- La duración de la carga de baterías es muy corta (1 hora) para este tipo de aplicación, y la recarga requiere un gran tiempo (2 o 3 horas).
- Debe mejorarse la torre de cámaras con una cámara con zoom óptico, que permita hacer acercamientos.

Se espera próximamente hacer pruebas de campo simuladas, supervisadas por técnicos antiexplosivos de las fuerzas militares, que proporcionen información y recomendaciones que serán tenidas en el desarrollo del segundo prototipo.

#### 4. MEJORAS DEL PROTOTIPO

Con el objeto de mejorar el primer modelo, se desarrollará un segundo prototipo (en fase de diseño), más liviano (cerca de 50 Kg), más rápido,

con mayor autonomía en cuanto a la carga de las baterías y alcance de control remoto. Se implementará un sistema de orugas de caucho más livianas que permitan subir escaleras con un centro de gravedad más bajo.



*Fig. 9. TMR2 Futuro Prototipo*

Se realizarán estudios para incorporará sensores de metales ó de minas y sensores de gases químicos (Como una Nariz Electrónica), que permitan detectar compuestos emitidos por explosivos y además con la opción de implementarlos en aplicaciones de detección de Narcóticos, entre otros.

#### 5. CONCLUSIONES

Se diseño y construyo un prototipo muy robusto y funcional, que al ser mejorado podría ser muy útil para los organismos de seguridad y atención de emergencias, que requieren equipos versátiles de fácil transporte en situaciones que presenten riesgos para las personas (Ej.: Búsqueda de sobrevivientes en zona de desastre como derrumbes o minas colapsadas, neutralización de artefactos explosivos y tareas de desminado humanitario, zonas con contaminación química o riesgo biológico, detección de narcóticos, manipulación de materiales radioactivos, etc.).

#### REFERENCIAS

- Bennet, P. C. – SAND REPORT: “Robotic Mobile Manipulation Experiments at the U.S. Army Maneuver Support Center” Sandia National Laboratories, June, 2002.
- Mcfee, J. E.; Aitken, V.; Chesney, R.; Das, Y. and Russell, K. “A multisensor, vehicle mounted,

- teleoperated mine detector with data fusion". Proc. SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Mine-like Targets III. Vol.3392, Orlando, FL, USA, 13-17 April, 1998.
- Olivares, R.; Zhou, C.; Adams, J. and Bodenheimer, B. "Interface Evaluation for Mobile Robot Teleoperation". Proceedings of the ACM Southeast Conference (ACMSE03), pp. 112-118, Savannah, GA, March, 2003.
- Ollero, A. *Robótica manipuladores y robots móviles*. Alfaomega. 2001.
- Sen Gupta, G.; Mukhopadhyay, S.C.; Messom, C. H. and Demidenko, S. "Master-Slave Control of a Teleoperated Anthropomorphic Robotic Arm". IMTC 2005 – Instrumentation and Measurement Technology Conference Ottawa, Canada, with Gripping Force Sensing, 17-19 May, 2005.



**MATHEMATICAL MODELING OF THE SCHEDULING ASSIGNMENT  
PROBLEM FOR BUSINESSES OF VARYING DEMAND****MODELAMIENTO MATEMATICO DEL PROBLEMA DE ASIGNACION DE  
HORARIOS PARA EMPRESAS DE DEMANDA VARIABLE**

**Ing. Natalia Bohórquez Bedoya, Ing. David Alvarez Martínez**  
**MSc. Eliana Mirledy Toro Ocampo**

**Universidad Tecnológica de Pereira**

Vereda La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia

Tel.: 57-6-3137205, Fax: 57-6-3137122, E-mail: {davidalv, elianam}@utp.edu.co

**Abstract:** This paper presents a mathematical model for multiskilled workforce scheduling problems in schemes of fast food restaurant chains, where services are offered every day of the year and the model has to fulfill with the operating and labor restrictions of the Colombian laws. The aim of this model is to control and reduce the costs of the staff allocation fulfilling with the market demand. With the purpose of to verify the effectiveness of the model, we create an encoding which allows resolving the problem efficiently by using heuristics or metaheuristics.

**Resumen:** En este artículo se presenta un modelo matemático para la solución de problemas de asignación de horarios de personal que desempeñan múltiples funciones en cadenas de restaurantes de comidas rápidas ofreciendo sus servicios los 365 días del año teniendo en cuenta que deben cumplir restricciones operativas y laborales enmarcadas en la legislación colombiana. El objetivo de este modelo es controlar y reducir los costos correspondientes a la asignación de personal cumpliendo con la demanda del mercado. Con el fin de verificar la efectividad del modelo se plantea una alternativa de codificación que permita resolver el problema de forma eficiente mediante el uso de heurísticas o metaheurísticas.

**Keywords:** Multiskilled workforce scheduling, Mathematical model, Encoding.

## **1. INTRODUCCION**

El problema de la asignación de horarios es ampliamente estudiado en el campo de la investigación operativa e impacta fuertemente el desarrollo económico del país porque a partir de él se define la demanda de personal en las organizaciones. Es importante anotar que el factor humano se constituye en el elemento a optimizar debido al costo asociado a su contratación ya que recae directamente sobre el precio del bien o servicio que se ofrece al consumidor final.

El problema de la organización de horarios, en muchas ocasiones alcanza unas dimensiones que lo hacen intratable de forma manual. Esta situación requiere de especial atención en aquellas organizaciones que tienen que cubrir unos servicios que se prolongan en el tiempo más allá de una jornada laboral, las que tienen una demanda de servicios fluctuante, las que deben ajustar su servicio a la demanda de un público incierto, entre otras.

El problema de la organización de horarios es de una gran extensión tanto por sus características como por las técnicas que se utilizan. Cada uno de los grupos y subgrupos que se presentan para esta clasificación están descritos mediante un modelo básico en el que se destacan los datos de entrada o parámetros del problema y las variables.

Con base en el número de personas por cargo, (Bechtold y Brusco, 1994), definieron un modelo para minimizar el número de personas por cargo; (Brusco y Jacobs, 1998) adicionalmente valoraron la tarea y (Thompson, 1995) valora el excedente de personal. Realizando asignación de personas, (Hillier, J. Lieberman, 2001) presentan el modelo clásico de asignación uno a uno; (Bechtold y Brusco, 1994) muestran un modelo que permite la asignación de una tarea a varias personas y (Toro, 2005) aborda el problema donde una persona puede ejecutar varias tareas. De acuerdo a la agrupación por jornadas de trabajo (Day y Ryan, 1997), presentan una propuesta. Con base en la creación de patrones, aparece una propuesta de (Beaumont, 1997), donde se hace una programación por días libres; (Laporte, 1999), propone un modelo donde se asignan turnos de trabajo y días libres y (Emmons y Burns, 1991) hace una Programación de días libres de acuerdo a categorías.

Como se observa en la literatura disponible sobre la temática se presentan muchos modelos que segmentan la situación de acuerdo a alguna característica específica, en este trabajo se presenta un modelo matemático que integra muchas de estas variantes ya que en los problemas reales están presentes simultáneamente.

## 2. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Actualmente las organizaciones competitivas deben adaptarse rápidamente a los cambios del mercado, en la categoría de restaurantes de comidas rápidas, sus clientes esperan un servicio ágil y eficaz, además el cumplimiento de la promesa de venta que hacen quienes se encargan de la atención al cliente, generalmente al terminar de facturar la compra: “el pedido se demora aproximadamente ‘tantos’ minutos”, el cliente espera que llegue en ese tiempo o antes un producto de alta calidad y con las condiciones especificadas, esto hace parte fundamental de la satisfacción y fidelización del cliente, siendo este el objetivo principal que persiguen las empresas para mantenerse en el mercado. La necesidad de adaptarse a las condiciones del mercado, ha hecho

que este tipo de organizaciones flexibilice sus horarios y jornadas laborales, con el fin de responder eficientemente a una demanda que varía hora tras hora, considerando el bienestar de los trabajadores y teniendo en considerando la contratación por horas, demanda fluctuante, políticas internas y legislación laboral se mezclan para hacer de la asignación de personal.

En este orden de ideas, el primer subproblema se relaciona con la asignación operativa, es decir, la asignación que se da por carga de trabajo, analizada media hora a media hora según la demanda histórica (nivel y mezcla de ventas) del restaurante, además se tienen en cuenta otras condiciones de operatividad de los restaurantes, tales como el prealistamiento y la recepción de pedido de materia prima e insumos. La demanda junto con otras condiciones específicas para la adecuada operación del restaurante, determinan el número de personas necesarias en cada período de asignación; estas horas son de obligatorio cumplimiento, debido a que contar con el personal necesario para atender una demanda específica es vital para asegurar la satisfacción de los clientes. A partir de esta asignación operativa se obtienen los parámetros con los que se formularán algunas restricciones específicas dentro del modelo matemático, asegurando que este personal operativo se asigne.

El segundo subproblema se denomina: Asignación Administrativa, es la asignación dada por el cumplimiento de las Restricciones Administrativas definidas por el Área de Gestión Humana, con el fin de flexibilizar los contratos de trabajo acorde con las necesidades de la empresa, enmarcadas en la actual legislación laboral colombiana. Otras restricciones administrativas han sido definidas en conjunto Área de Gestión Humana, Ingeniería y Directores Regionales, con el objetivo de satisfacer necesidades particulares de los restaurantes.

Estas restricciones, así como las operativas, son también de obligatorio cumplimiento, debido a que obedecen a políticas estatales de contratación laboral para flexibilizar los horarios y para facilitar la consecución del personal; sin embargo, la diferencia más importante con relación a las horas operativas, es que las horas administrativas pueden ubicarse en cualquier período posible del horizonte de asignación, donde el modelo lo encuentre más conveniente para cumplir la función objetivo, mientras que las horas operativas son inamovibles desde el momento que se asignan con los criterios aplicados a cada cargo.

Es importante aclarar que la Asignación Operativa se realiza sin evaluar ninguna función objetivo, debido a que no es necesario hacer elecciones entre alternativas, sino que es una asignación simple con base en unos rangos establecidos por la empresa. Adicionalmente se plantean restricciones de consecutividad de horas para dar cumplimiento a las condiciones de turnos segmentados.

Las Restricciones Operativas son aquellas que se relacionan directamente con la demanda o necesidades internas del restaurante. No pueden dejar de asignarse y son inamovibles. Los elementos que hacen parte de las Restricciones Operativas son necesarias para la adecuada operación del restaurante:

- Prelistamiento y recepción de pedido
- Demanda
- Políticas generales

#### *Prelistamiento y recepción de pedido*

Las horas de prelistamiento se ejecutan diariamente antes de la apertura del restaurante para atención al público y son tomadas en cuenta como parte del horizonte de trabajo, ya que estas cuentan en el total de horas de la jornada laboral de los cargos que realizan esta actividad.

#### *Demanda*

El procedimiento para asignar el personal con base en las ventas del restaurante se obtiene de un consolidado de ventas, el cual muestra el promedio de transacciones día a día, hora a hora.

#### *Políticas generales*

Son políticas específicas que garantizan el funcionamiento de los puntos de venta, tales como:

- Mínimo número de personas en las horas de prelistamiento, aperturas, horas de alta demanda.
- Cargos que siempre deben estar disponibles todo el tiempo de operación.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO

El problema que se presenta corresponde a la programación de personal en cadenas de restaurantes, donde se representan las condiciones específicas de un tipo de establecimiento comercial con demanda variable de acuerdo al día de la semana y a la hora del día, situaciones de este tipo la plantea (Batero, 2007) y (Bohórquez, 2008). Para el planteamiento de este modelo se debe conocer la demanda en cada uno de los períodos y para cada uno de los cargos. El horizonte de

tiempo considerado es de una semana, divididos en días y a su vez, los días divididos en intervalos de tiempo de 30 minutos. Los trabajadores se agrupan de acuerdo al tipo de contrato: fijo ó temporal, con las siguientes consideraciones:

#### **a. Contrato fijo**

Personal de contrato fijo debe laborar 8 horas diarias, no se permite programar horas extras y si es necesario dividir la jornada diaria en dos turnos, cada turno como mínimo debe ser programado por tres horas consecutivas. Adicionalmente se debe planear un día a la semana para su descanso.

#### **b. Contrato jornada variable**

Bajo este tipo de contratación se encuentran las siguientes variaciones:

- Tipo b.1: Labora todos los días de la semana (lunes a domingo) Como mínimo 4 horas diarias y como máximo 7 horas diarias de lunes a viernes
- Tipo b.2: No labora todos los días de la semana.
- Tipo b.3: Trabaja únicamente fines de semana

De acuerdo a la demanda se definen tareas y estas deben ser realizadas por distintos trabajadores a tiempo parcial, por tanto un empleado puede realizar más de una tarea, quiere decir esto que es necesaria la polivalencia dentro de los cargos. Otro aspecto de relevancia es la hora de cierre del establecimiento, este dato varía de acuerdo a la ubicación del punto de venta.

#### **3.1 Índices y variables utilizadas**

$i = 1$  Jornada Completa.

$i = 2$  Jornada Variable.

$j = \text{cargos principal} + \text{cargos secundario}$  ( $j = j_1, \dots, j_t$ ).

$k = \text{Hora del día}$  ( $K = 1, 2, \dots, HC$ ).

$l = \text{día de la semana}$  ( $l = 1, 2, \dots, 7$ ).

$HC = \text{Hora de cierre del establecimiento}$ .

$X_{ijkl}$  = Variable binaria que toma el valor de 1 si la persona  $j$  ha sido asignada a una jornada  $i$  (completa o variable), en el período de asignación  $k$  el día  $l$  y 0 en caso contrario.

De acuerdo a la demanda se definen tareas y estas deben ser realizadas por distintos trabajadores a tiempo parcial, por tanto un empleado puede realizar más de una tarea, quiere decir esto que es necesaria la polivalencia dentro de los cargos.

Otro aspecto de relevancia es la hora de cierre del establecimiento, este dato varía de acuerdo a la ubicación del punto de venta.

El subíndice  $j$  determina el cargo principal y cada uno de los cargos (denotados aquí como cargos secundarios). Los cuatro primeros dígitos de este subíndice representan el cargo principal. Los cuatro últimos dígitos representan el cargo secundario que puede ejercer por polifuncionalidad. En la tabla 1 se describe un ejemplo.

Tabla 1. Representación del subíndice  $j$

01010101	Cocinero	Cocinero
01010102	Cocinero	Despacho autoservicio

La fila 1 de la tabla 1 representa un individuo que está programado para el cargo  $i$  y está ejecutando una tarea propia del cargo. La fila 2 indica que una persona programada para la tarea de cocinero pero está ejecutando una tarea de otro cargo.

### 3.2 Modelo matemático

#### 3.2.1 Función Objetivo

Consiste en minimizar el tamaño de la planta de personal, según la Ecu. (1).

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=J_i}^{J_f} \sum_{k=1}^{H_c} \sum_{l=1}^7 X_{ijkl} \quad (1)$$

#### 3.2.2 Restricciones

Debe haber suficiente número de empleados en todos los períodos para satisfacer la demanda y a que se cumplan las restricciones administrativas, relacionadas principalmente con la flexibilización de horarios.

En la naturaleza del problema analizado se considera que se representa mejor la situación definiendo la asignación cada media hora, por tanto se programan 16 medias horas diarias por cargo y por tarea.

#### 3.2.3 Para número de horas permitidas en 1 día

Se formula una restricción para cada una de los cargos principales del conjunto  $j$ , y a su vez para cada día  $l$ . La sumatoria de las horas asignadas a una persona, en los diferentes cargos que puede ejercer, durante el horizonte de asignación de un día  $l$ , no debe ser mayor que el máximo de horas permitidas para la jornada  $i$ , ni menor que el mínimo de horas permitidas para misma jornada, tal como se muestra en la Ecu. (2).

Para  $i=1$  jornada completa:

$$\sum_{j=J_i}^{J_f} \sum_{k=1}^{H_c} X_{ijkl} = 16 Y_m \quad \forall i=1; l=1, 2, \dots, 7 \quad (2)$$

En la Ecu. (2)  $Y_m$  Representa una variable binaria que toma el valor de 1 si se representa personal de jornada completa y 0 en caso contrario.

Para  $i=2$  jornada variable:

Las Ecu. (3) y (4) determinan el valor de  $W_{j'l}$ , la cual es un variable binaria que está definida por cada persona de jornada variable del conjunto  $j'$  que va definido  $\{j_i, \dots, j_f\}$  y toma el valor 1 cuando la persona  $j$  ha sido asignada a cualquier periodo  $k$  del horizonte de asignación en el día  $l$ . En otras palabras, la variable es igual a 1 si la persona  $j$  trabajó algún segmento de tiempo el día  $l$ .

$$\sum_{j=J_i}^{J_f} \sum_{k=1}^{H_c} X_{ijkl} \geq W_{j'l} \quad \forall i=2; l=1, 2, \dots, 7 \quad (3)$$

$$\sum_{j=J_i}^{J_f} \sum_{k=1}^{H_c} X_{ijkl} \leq 16 W_{j'l} \quad \forall i=2; l=1, 2, \dots, 7 \quad (4)$$

Así mismo para activar las Ecu. (2, 3, 4) que corresponden a la cantidad de días que trabaja una persona, se requiere una nueva variable auxiliar binaria  $Z_n$  que activa un grupo de restricciones determinado, si se cumple una condición dada por  $W_{j'l}$ . La variable  $Z_n$  se define para cada persona del conjunto  $j$  y a su vez para cada los tres tipos de contrato en jornada variable. Si la está variable toma el valor de 0 es porque la condición se cumple y por lo tanto las restricciones asociadas a ella se deben cumplir. El subíndice  $n$  es un número entero consecutivo. Como es usual en la notación de la programación lineal entera,  $M$  es un número positivo grande.

#### Jornada variable tipo 1

El máximo de medias horas a trabajar es 14. Se formula inicialmente una restricción que indica si la persona está asignada o no todos los días, dada en la Ecu. (5), y complementada con las Ecu. (6) y (7).

$$\sum_{l=1}^7 W_{j'l} - 6 \leq M(1 - Z_n) \quad \forall j' = j'i, \dots, j'f \quad (5)$$

Diaria

$$-\left[ \sum_{j=J_i}^{J_f} \sum_{k=1}^{H_c(l)} X_{ijkl} - 8 Y_{m+1} \right] \leq M Z_n \quad \forall i=2; l=1, 2, \dots, 7 \quad (6)$$

$$-\left[ 14 Y_{m+1} - \sum_{j=J_i}^{J_f} \sum_{k=1}^{H_c(l)} X_{ijkl} \right] \leq M Z_n \quad \forall i=2; l=1, 2, \dots, 7 \quad (7)$$

#### Jornada variable tipo 2

Si el personal de jornada variable no labora todos los días de la semana, el mínimo de horas diarias

que debe laborar entre semana de lunes a viernes es de 8 medias horas y los sábados y domingos debe laborar obligatoriamente 16 medias horas.

Se formula inicialmente la Ecu. (8) que indica si la persona no fue asignada todos los días de la semana. Luego se formulan las restricciones representadas desde las Ecu. (9) a (13) que acotan la cantidad de horas que debe cumplir y se activan sólo si la Ecu. 8 se cumple:

$$7 - \sum_{l=1}^7 W_{j'l} \leq M(1 - Z_{n+1}) \quad \forall j' = j'_1, \dots, j'_f \quad (8)$$

$$-\left[ \sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC(l)} X_{ijkl} - 8Y_{m+1} \right] \leq MZ_{n+1} \quad \forall i = 2; l^* \quad (9)$$

$$-\left[ 14Y_{m+1} - \sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC(l)} X_{ijkl} \right] \leq MZ_{n+1} \quad \forall i = 2; l^* \quad (10)$$

$l^*$  Representa los días de la semana que se labora.

Mínimo semanal de lunes a viernes.

$$\sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC(l)} \sum_{l=1}^5 X_{ijkl} \leq MZ_{n+1} \quad \forall i = 2 \quad (11)$$

Fines de semana:

$$-\left[ \sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC(l)} X_{ijkl} - 16Y_{m+1} \right] \leq MZ_{n+1} \quad \forall i = 2; l = 6, 7 \quad (12)$$

$$\sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC(l)} X_{ijkl} \leq 16Y_{m+1} \quad \forall i = 2; l = 6, 7 \quad (13)$$

### Jornada variable tipo 3

Si el personal sólo labora los fines de semana (sábado y domingo) debe laborar mínimo 16 medias horas diarias y 32 medias horas semanales. La Ecu. (14) indica si la persona sólo está asignada los fines de semana y luego la Ecu. (15) que determina el mínimo de horas a cumplir.

$$1 - \sum_{l=1}^5 W_{j'l} \leq M(1 - Z_{n+2}) \quad \forall j = j'_1, \dots, j'_f \quad (14)$$

$$\sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC(l)} X_{ijkl} - 16Y_{m+1} \leq MZ_{n+2} \quad \forall i = 2; l = 6, 7 \quad (15)$$

### 3.2.4 Para número de horas permitidas en 1 semana

#### Restricciones

Para  $i=1$  jornada completa, Ecu. (16).

$$\sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC} \sum_{l=1}^7 X_{ijkl} = 112 Y_m \quad \forall i = 1; \quad (16)$$

Para  $i=2$  jornada variable, Ecu. (17) y (18).

$$\sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC} \sum_{l=1}^7 X_{ijkl} \geq 56 Y_{m+1} \quad \forall i = 2; \quad (17)$$

$$\sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{k=1}^{HC} \sum_{l=1}^7 X_{ijkl} \leq 98 Y_{m+1} \quad \forall i = 2; \quad (18)$$

**Para asignar a una persona únicamente una de las dos jornadas, Ecu. (19).**

$$Y_m + Y_{m+1} = I \quad (19)$$

**Para evitar el cruce de horas, Ecu. (20).**

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^7 X_{ijkl} \leq 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, HC; \quad \forall l = 1, 2, \dots, 7 \quad (20)$$

El intervalo del subíndice  $j$  para estas restricciones se define como:

Conjunto  $\{j/j\}$  pertenece a los códigos cuyos quinto, sexto, séptimo y octavo dígitos son iguales}.

**Asociadas a la obligatoriedad de la asignación de horas operativas, Ecu. (21).**

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^7 X_{ijkl} = a \quad (21)$$

$$\forall k = 1, 2, \dots, HC; \quad \forall l = 1, 2, \dots, 7$$

$a$ : representa el número de personas que requieren para el cargo  $j$  en la hora  $k$  el día  $l$ .

**Para evitar las horas paralelas para una misma persona**

Cada persona puede realizar varios cargos, por polifuncionalidad, pero esta característica no permite la simultaneidad de las labores. Estas restricciones evitan que a una misma persona, sea asignado dos veces o más, el mismo período de asignación  $k$ , en un mismo día  $l$ .

Se formula una restricción para cada una de los cargos principales del conjunto  $j$ , y a su vez para cada día  $l$ . Ecu. (22).

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=j_i}^{j_f} X_{ijkl} \leq 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, HC; \quad \forall l = 1, 2, \dots, 7 \quad (22)$$

**Aseguran la consecutividad de mínimo 3 horas en la jornada laboral de una persona, Ecu. (23).**

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=j_i}^{j_f} \sum_{p=k}^{k+6} x_{ijpl} \geq 6 \quad \forall l = 1, 2, \dots, 7 \quad (23)$$

**Para dar prioridad a la jornada completa**

Para este modelo se trabaja únicamente la prioridad de la jornada completa frente a la variable, por lo



tanto en las restricciones se busca que se asignen tantas jornadas completas como sea posible, para ello se proponen 2 metodologías para cumplir este objetivo:

- Agregar una penalización a las variables que representan la asignación jornada variable en la función objetivo de forma que no sean atractivas para que hagan parte de la solución.
- Otra alternativa consiste en agregar una restricción por cada cargo, que establezca el número mínimo de personas de Jornada completa que sea deseable para una asignación de horarios en particular, tal como lo representa el Ecu. (24).

$$\frac{\sum_j \sum_{k=1}^{HC(l)} X_{jkl}}{16} \geq \text{número deseable de tiempos completos} \quad (24)$$

#### 4. CODIFICACION

Se desea realizar la programación semanal de tareas y horarios de personal, para esto se necesita codificar la información necesaria del personal a ser contratado, esta tarea se dividirá en dos partes: una parte será la contratación la cual describe la información necesaria sobre que tipo de contrato, que funciones o cargos puede desempeñar, la hora de inicio de sus labores y el número de periodos de tiempo que laborará, la segunda parte será la descripción de que tarea debe cumplir cada empleado, para cada periodo del día, durante cada día de la semana.

La información necesaria para la contratación se puede representar en un arreglo matricial donde las filas representan cada empleado y las columnas los atributos que describen la contratación de este.

El primer atributo es el tipo de contrato, el cual se puede representar con número entero en un rango desde 1 hasta el número máximo de diferentes tipos de contratos que existan, en este trabajo o en el caso colombiano las restricciones legales presentan sólo 4 diferentes tipos de contrato, contrato fijo, contrato variable tipo 1, tipo 2 y tipo 3.

El segundo atributo son las funciones o cargos que puede desempeñar el empleado, este se representa como una lista no vacía de números enteros que codifican los cargos existentes.

Dependiendo de las restricciones del establecimiento se puede encontrar diferentes polifunciones o su opuesto donde los empleados sólo están capacitados para cumplir una única función.

El tercer y cuarto atributo son la hora de entrada y el número de horas laboradas por el empleado para esa entrada respectivamente, estos datos se representan como una lista de parejas de números enteros  $(he_i, hl_i)$ , donde  $he_i$  es el periodo de tiempo de ingreso a laborar y  $hl_i$  es el número de periodos laborados, para la  $i$ -ésima entrada del día.

Dependiendo de las restricciones legales el número de entradas puede aumentar o disminuir. En el caso colombiano mínimo se puede planificar 3 horas por cada entrada a laborar por lo tanto máximo se pueden programar 2 entradas al día.

Los cuatro atributos se pueden codificar en un vector representando así la información necesaria para la contratación de cada empleado, la figura 1 nos ilustra la estructura.

Por ejemplo en el caso colombiano el vector de empleado se limita a sólo 4 tipos de contrato, las funciones dependen del establecimiento y solamente hay dos entradas a laborar por día, además de esto los valores HE1, HE2, HL1 y HL2 deben cumplir las restricciones del modelo matemático (Ver la figura 2).

Tipo 1, Tipo 2, ..., Tipo m	{Cargo 1, Cargo 2, ..., Cargo n}	{(HE 1, HL 1), (HE 2, HL 2), ..., (HE p, HL p)}
Tipo de Contrato	Funciones o Cargos	Hora de Entrada, Horas a Laborar

Fig. 1. Vector empleado

Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3, Tipo 4	{Cargo 1, Cargo 2, ..., Cargo n}	{(HE 1, HL 1), (HE 2, HL 2)}
Tipo de Contrato	Funciones o Cargos	Hora de Entrada, Horas a Laborar

Fig. 2. Vector empleado y sus restricciones caso colombiano

La tarea desempeñada durante cada hora de trabajo es un atributo que se codifica mediante la matriz de tareas. La matriz de tareas realmente es un arreglo de datos de 3 dimensiones  $j, k$  y  $l$ .  $j$  representa el empleado,  $k$  el periodo de día y  $l$  el día de la semana. Por lo tanto la matriz tareas  $(j, k, l) = T$ , donde  $T$  es la tarea a desempeñar el empleado  $j$  en el periodo  $k$  el día  $l$ . En la figura 3 se presenta el esquema de la matriz.

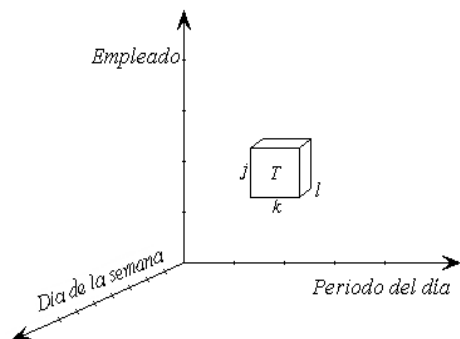


Fig. 3. Matriz de tareas

**Ejemplo:**

Para clarificar la idea propuesta se presenta un ejemplo que representa la codificación planteada.

En la tabla 2 se presenta la información de requerimientos de 1 día, donde las filas son los cargos requeridos y las columnas son los períodos del día, el valor dentro de la matriz indica el número de personas en el cargo  $j$  en el período  $k$ .

Tabla 2. Matriz de requerimientos de un día  $l$ 

Cargos $i$ \ Período $k$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cocinero (1)	1	1	2	2	3	4	2	2	1	4
Mesero (2)	1	1	2	1	2	2	2	2	1	2
Cajero (3)	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2
Mensajero(4)	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1

En la tabla 3 se presentan las polifunciones de los cargos, donde se indica que la polifunción 5 la pueden ejecutar los cargos 1 y 2; la polifunción 6 la pueden ejecutar los cargos 3 y 4.

Tabla 3. Polifunciones existentes

Polifunción	Cargos
1	1
2	2
3	3
4	4
5	1,2
6	3,4

En la tabla 4 se presenta una matriz de respuestas donde se indica toda la información requerida para programar la hora de entrada y salida de cada empleado y la tarea a realizar en cada segmento de tiempo, así como el tipo de contrato con el que debe vincularse, es de anotar que en este ejemplo

sólo se está considerando 1 día, en la medida que se consideren más días de la semana la matriz tendrá otras 6 capas correspondientes al martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo.

En la tabla 4 la primera fila corresponde a los siguientes ítems:

Columna 1: Empleado.

Columna 2: Tipo de Contrato.

Columna 3: Polifunción.

Columna 4: Hora entrada 1.

Columna 5: Horas laboradas 1.

Columna 6: Hora de entrada 2

Columna 7: Horas laboradas 2.

Evaluando el renglón 2 se tiene que el empleado  $a$  tiene un tipo de contrato 1, realizará la polifunción 1, ingresará a la hora 3 y laborará 4 horas, luego ingresará a la hora 7 y laborará 4 horas.

Tabla 4. Contratación por empleado

1	2	3	4	5	6	7
a	1	1	3	4	7	4
b	1	2	3	4	7	4
c	1	3	3	4	7	4
d	2	1	4	4	8	3
e	2	2	5	3	8	3
f	1	1	1	3	6	5
g	2	5	1	3	4	3
h	2	3	1	3	5	3
i	2	4	2	4	8	3
j	2	6	7	4		
k	1	1	8	3		

En la tabla 5 se presenta hora a hora la actividad que debe desempeñar cada empleado de acuerdo con las polifunciones, planteadas en la tabla 3. Así el empleado  $j$  realizará la polifunción 6 que corresponde a ser cajero o mesero, por tanto de 7 a 9 será mensajero y de 9 a 11 será cajero.

Esta contratación realizada puede ser medida mediante diferentes indicadores de eficiencia, el que se propone en este trabajo es la minimización de personas contratadas, pero bien podría ser la proporción de carga distribuida, la cual consiste en la relación de la horas contratadas (sumatoria de las columnas 5 y 7 de la tabla 4) sobre las horas realmente laboradas (sumatoria de toda la matriz de requerimientos, tabla 2), en este caso la contratación tiene un 76% de eficiencia.

Tabla 5. Programación para un día de la semana

Período k \ Empleado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a			C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
b			C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2
c			C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
d				C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1
e					C2	C2	C2	C2	C2	C2
f	C1	C1	C1			C1	C1	C1	C1	C1
g	C2	C2	C2	C1	C1	C1				
h	C3	C3	C3		C3	C3	C3			
i		C4	C4	C4	C4	C4	C4	C4	C4	C4
j							C4	C4	C3	C3
k								C1	C1	C1

## 5. CONCLUSIONES

Se presentó un modelo matemático que representa las condiciones específicas de una cadena de restaurantes en cuanto a la asignación del personal.

El modelo matemático presentando es lo suficientemente flexible y permite el cambio en sus condiciones particulares.

Por su naturaleza el modelamiento matemático requiere de una alta dosis de ingenio e innovación, por lo que es imposible describir un procedimiento estándar que deba seguirse siempre.

El modelo matemático propuesto es del tipo NP completo debido a la alta complejidad matemática, en estos casos las técnicas metaheurísticas son las que mejor desempeño han mostrado.

Se presentó una propuesta de codificación como paso inicial para la implementación de cualquier técnica metaheurística a fin de validar el modelo matemático y los casos de prueba que puedan proponerse.

## REFERENCIAS

- Batero, V. *Planteamiento del modelo matemático básico que represente de forma adecuada el problema de asignación de personal para un restaurante tipo calle de la compañía Frisby S.A.*, Trabajo de grado, 2007, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Beaumont, N. *Using mixed integer programming to design employee rosters*, Journal of Operational Research, vol. 48, 1997, pp. 585-590.
- Bechtold, S. and Brusco, M. *Working set generation methods for labor tour scheduling*. European Journal of Operational Research, vol. 74, 1994, pp. 540-551.
- Bohórquez, N. *Ampliación del modelo matemático que representa el problema de asignación de personal, formulado actualmente para un restaurante particular, a todos los tipos de restaurantes de la empresa Frisby S.A.*, Trabajo de grado, 2008, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Brusco, M. and Jacobs, L. *Eliminating redundant columns in continuous tour scheduling problems*, European Journal of Operational Research, vol. 111, 1998, pp. 518-525.
- Day, P. and Ryan, D. *Flight attendant rostering for short airline operations*, Operations Research, vol. 45, 1997, pp. 649-661.
- Emmons, H. and Burns, R. *Off-day scheduling with hierarchical worker categories*, Operations Research, 1991, vol. 39, No 3, pp. 484-495.
- Escalpes, C. *Asignación de conductores a jornadas de trabajo en empresas de transporte colectivo*, Tesis doctoral en Estadística e Investigación operativa. 2000. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Gallego, R.; Escobar, A. y Toro, E. *Técnicas Metaheurísticas de Optimización*, Universidad Tecnológica de Pereira, Julio 2008.
- Hillier, F. y Lieberman, J. *Investigación de Operaciones*, Editorial McGraw-Hill, México 2001.
- Bechtold S., Brusco M. *A microcomputer-based heuristic for tour scheduling of a mixed workforce* Computers and Operations Research, vol. 21, 1994, pp. 1001-1009.
- Laporte, G. *The art and science of designing rotating schedules*, Journal of Operational Research, vol. 50, 1999, pp. 1011-1017.
- Thompson, G., *Labor scheduling using NPV estimates of the marginal benefit of additional labor capacity*, Journal of Operations Management, vol. 13, 1995, pp. 67-86.
- Toro, E.; Romero, R. y Granada, M. *Algoritmo mimético aplicado a la solución del problema de asignación generalizada*, Tecnura, Año 8, No 16, 2005, pp. 55-63.

Recibido: 12 de marzo de 2009  
Aceptado: 01 de junio de 2009**SELECTION OF THE INSTRUMENTATION AND PROCESS VARIABLES OF A  
BIODIGESTION SYSTEM IN SEPARATE PHASES (ACIDOGENESIS AND  
METHANOGENESIS)****SELECCION DE LA INSTRUMENTACION Y VARIABLES DE PROCESO DE  
UN SISTEMA DE BIODIGESTION EN FASES SEPARADAS  
(ACIDOGENESIS Y METANOGENESIS)****PhD. Jacipt Alexander Ramón V., Ing. Erika Yesenia Carrillo Sánchez  
PhD. Mario Javier Vargas****Universidad de Pamplona**

Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS)

Tel: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 140

E-mail: {jacipt, mvargas}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** The control of biochemical processes in which the degradation of biomass by the action of microorganisms allows the generation of alternative energy carries with it the importance of selecting proper instrumentation to provide an optimum monitoring and control of the process variables, taking into account the above In this paper describes the selection criteria for implementation of a process of anaerobic biodigestión in separate phases in which they monitor and control variables such as pressure, temperature, pH level, agitation, determining factors in stages in the acidic and methanogenic degradation of the material and production of biogas.

**Resumen:** El control de procesos bioquímicos en donde la degradación de la biomasa por la acción de microorganismos permite la generación de energías alternativas lleva consigo la importancia de seleccionar adecuadamente la instrumentación que proporcione un óptimo monitoreo y control de las variables del proceso; teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se describe los criterios de selección de instrumentación de un proceso de biodigestión anaerobia en fases separadas en el que se supervisarán y controlarán variables como presión, temperatura, pH, nivel, agitación, factores determinantes en las fases acidogénica y metanogénica en la degradación de la materia y producción de biogás.

**Keywords:** Acidogénesis, biodigestion anaerobic, biodigestor, detailed, level, methanogenesis, measurement, pH, pressure, temperature, separate phases.

**1. INTRODUCCION**

Los procesos industriales exigen el control de la fabricación de los diversos productos obtenidos. Los procesos son muy variados y abarcan muchos tipos de productos: la fabricación de los productos

derivados del petróleo, de los productos alimenticios, la industria cerámica, las centrales generadoras de energía, la siderurgia, los tratamientos térmicos, la industria papelera, la industria textil, la industria química, entre otros. (Bustillos, 2001).

En todos estos procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el pH, entre otros. Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas constantes en condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar (Bustillos, 2001).

El sistema de control exige pues, para que esta comparación y subsiguiente corrección sean posibles, que se incluya una unidad de medida, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso, mediante estas unidades se compara el valor de la variable o condición a controlar con un valor deseado y se toma una acción de corrección de acuerdo con la situación existente sin que el personal intervenga en absoluto (Bustillos, 2001).

## 2. CALCULO DE LAS VALVULAS DE CONTROL DE PRESION

Para el cálculo de las válvulas de control de presión se utilizaron datos del diseño de una planta generadora de biogás, a partir de las siguientes variables:

$$Q = 0.79222825 m^3/s$$

$$P_{11} = P_{13} = 3.8394 \text{ psia}$$

$$P_{12} = P_{14} = 2.4885 \text{ psia}$$

$$T = 32.5^\circ C$$

En la figura 1 se muestra el esquema general del sistema, con sus respectivas válvulas de control de presión para la salida de los gases.

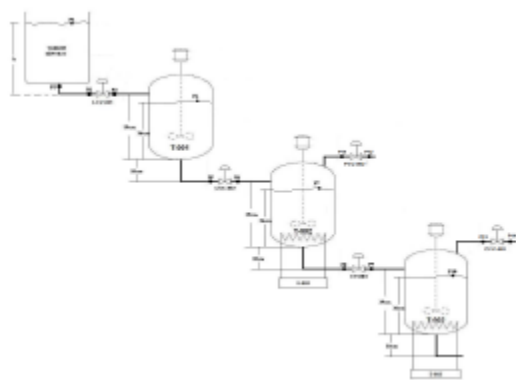


Fig. 1. Cálculo de las presiones del sistema para el cálculo de las válvulas PCV-002 y PCV-003

Para hacer el cálculo de estas válvulas se tuvo en cuenta la gravedad específica de los gases que se van a generar, esta se obtiene multiplicando los porcentajes de la composición molar de cada uno de los compuestos, con el fin de obtener mediante sus porcentajes, las temperaturas y presiones críticas para luego conseguir las temperatura y presiones reducidas para los gases generados. En la tabla 1 se muestra las características básicas de los gases (Carbono y Metano) que se generarán en el proceso de biodigestión para el cálculo y selección de las válvulas de presión.

Tabla 1. Características del Metano y el Dióxido de carbono

Gases	Porcentaje del gas combustible	G (lbs/ft <sup>3</sup> )	Temperatura Crítica (°C)	Presión Crítica (psi)
CH <sub>4</sub>	60 %	0.0251	-49.8	403.8
CO <sub>2</sub>	40 %	0.0468	12.4	428.8

La densidad es 0.159 lbs/ft<sup>3</sup>. Para obtener la densidad específica del gas, se divide la densidad entre la densidad del aire.

$$G=0.452201257$$

$$T_c=37.4^\circ C$$

Las temperaturas y presiones reducidas se obtienen mediante las siguientes ecuaciones 1 y 2:

$$P_r = \frac{\text{Presión del proceso (absoluta)}}{\text{Presión crítica (absoluta)}} \quad (1)$$

$$T_r = \frac{\text{Temperatura del proceso (absoluta)}}{\text{Temperatura crítica (absoluta)}} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta la tabla de compresibilidades, se nota que el factor de compresibilidad es  $Z=0.97$ . Ahora se calculará el  $C_v$  de la válvula, para lo cual se tendrán en cuenta los valores en unidades de bares correspondientes a las presiones.

$$P_{11}=0.169218 \text{ bar}$$

$$P_{12}=0.26453466 \text{ bar}$$

$$\Delta P= 0.09531666 \text{ bar}$$

$$P_{11} + P_{12}=0.43375266 \text{ bar.}$$

Aplicando todos los datos obtenidos a partir de ecuación 3 de la siguiente forma:

$$C_v = \frac{Q}{295} \sqrt{\frac{GTZ}{\Delta P(P_1 + P_2)}} \quad (3)$$

Se tiene que  $C_v = 0.049867346$



## 2.1 Cálculo de la placa de orificio

Con el fin de que se obtenga un  $\beta$  óptimo se escoge un  $\Delta P = 2.5$  bar y se hará un cambio de unidades a  $\text{kg/dm}^3$ . Donde  $G = 0.45 \text{ lbs/ft}^3 = 5.6932 \times 10^{-4} \text{ kg/dm}^3$ . Entonces se tiene las ecuaciones 4 y 5:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P}} = 0.11955246 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Como la tubería es de 2.54cm de diámetro, el diámetro de la placa orificio se obtiene mediante:

$$d = \sqrt[4]{\frac{4K_v^2 d^4}{d^4 p^2 + 4K_v^2}} = 1.8005 \text{ cm} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Las características de la válvula deben ser:

$$C_v = 0.049867346$$

$$K_v = 0.11955246$$

$$d = 1.8005 \text{ cm}$$

## 3. AGITADORES

### 3.1 Número de Reynolds

La transición del flujo laminar a flujo turbulento no depende únicamente de la velocidad del fluido sino también de su viscosidad y su densidad. El número de Reynolds es un parámetro utilizado para caracterizar el flujo de fluido. Para el caso del flujo desarrollado en tuberías con área transversal circular, el número de Reynolds  $Re$  se define como se muestra en la ecuación 6:

$$Re = \frac{D u r}{\mu} \quad (6)$$

Donde  $D$  = diámetro de la tubería.

$u$  = velocidad lineal media del fluido

$\rho$  = Densidad del fluido

$\mu$  = La viscosidad del fluido.

Como en nuestro caso, se trata de recipientes agitados, el número de Reynolds se define en la ecuación 7:

$$Re_i = \frac{N_i^2 D_i^2 r}{\mu} \quad (7)$$

Donde:

$Re_i$  = Número de Reynolds rodete.

$N_i$  = Velocidad del agitador.

$D_i$  = Diámetro del rodete.

$\rho$  = Densidad del fluido.

$\mu$  = La viscosidad del fluido.

El diseño del equipo de mezcla se utilizara un rodete que va soportado sobre el tanque. Hay que tener en cuenta que cuando se utilizan fluidos newtonianos, la relación entre el diámetro del tanque y la del rodete es normalmente 3:1. El rodete va colocado en la parte inferior de un agitador mecánico, situado en el centro del tanque, en este caso, el agitador se moverá por medio de un motor. (Doran, 1998)

El tipo de flujo existente en un tanque agitado depende del diseño del rodete, de las propiedades del fluido y del tamaño y las proporciones geométricas del recipiente, de los deflectores y del agitador.

Para nuestro caso, como el fluido contiene sólidos, utilizaremos un rodete de flujo axial ya que este impedirá que los sólidos se depositen en el fondo del tanque.

Otro de los aspectos importantes en el diseño del equipo de mezclado es el tiempo de la mezcla, ya que es un parámetro útil para valorar la efectividad de la mezcla y se aplica para la caracterización del flujo en fermentadores y reactores, que es el caso en cuestión. El tiempo de mezcla es el tiempo necesario para alcanzar un cierto grado de homogeneidad, partiendo de un estado completamente segregado.

Para mover los rodetes en los recipientes se utiliza energía eléctrica. Para una determinada velocidad de agitación, la potencia necesaria depende de la resistencia ofrecida por el fluido a la rotación del rodete. La potencia de mezcla para fluidos no aireados depende de la velocidad del agitador, del diámetro y geometría del rodete y de propiedades del fluido como la densidad y la viscosidad. (Doran, 1998)

El número de potencia  $N_p$  se define como se muestra en la ecuación 8:

$$N_p = \frac{P}{r N_i^3 D_i^5} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

$P$  = Potencia

$N_i$  = Velocidad del agitador.

$D_i$  = Diámetro del rodete.

$\rho$  = Densidad del fluido.

Como se trata de un régimen turbulento es independiente del número de Reynolds, entonces la potencia se calcula a partir de la ecuación 9:

$$P = N_p' r N_i^3 D_i^5$$

Donde  $N_p'$  es un valor constante del número de potencia en el régimen turbulento. En la tabla 2, se muestran los valores aproximados de  $N_p'$  para rodets de tipo turbina Rushton, canaleta, hélice marina, ancla y cinta helicoidal.

*Tabla 2. Valores de las Constantes  $K_l$  y  $N_p'$ .  
(Doran, 1998)*

Tipo de rodete	$K_l$ ( $R_e=1$ )	$N_p'$ ( $R_e=10^5$ )
Turbina Rushton	70	5-6
Canaleta	35	2
Hélice Marina	40	0.35
Ancla	420	0.53
Cinta Helicoidal	1000	0.35

Como el diámetro del tanque a utilizar en el diseño es de 36 cm, y teniendo en cuenta se debe mantener una relación de 3:1 entre el diámetro del tanque y el diámetro del rodete, entonces, el diámetro del rodete debe ser de 12 cm, y se va a utilizar del tipo hélice marina, ya que este opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos, aplicando la ecuación 9, se tiene:

$$\begin{aligned} N_p' &= 0.35 \\ \rho &= 961.107866 \text{ kg/m}^3 \\ N_i &= 1550 \text{ rpm o } 25.83333 \text{ rps} \\ D_i &= 0.12 \\ P &= 144.30 \text{ w} \end{aligned}$$

#### 4. MEDICION DE LA TEMPERATURA

Los sistemas térmicos son aquellos que comprenden la transferencia o transmisión de calor de una sustancia a otra (Ogata, 1993).

Existen diferentes sensores que se utilizan en la industria de procesos para medir la temperatura, entre los que se pueden mencionar: Termómetro de bulbo (líquido, gas y vapor); Termómetros bimetalicos; Termopares, Termoresistencias, etc.

La selección y especificación apropiada de un instrumento de temperatura, depende mucho del conocimiento de los diferentes tipos de sensores disponibles, de sus limitaciones y de consideraciones prácticas.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizarán sensores de temperatura de tipo RTD, debido a que son lineales, tienen elementos sensitivos basados en conductores metálicos, que cambian su resistencia eléctrica en función de la temperatura.

Inicialmente se trabajará con una PT100, que es un resistor, que cambia su valor según el cambio de la temperatura. Es un "PTC", un resistor con un "Positive Temperature Coefficient", es decir que cuando la temperatura aumenta, también el valor de resistencia aumenta.

#### 5. MEDICION DEL NIVEL

Para el desarrollo del proyecto se analizará los sistemas con flujo turbulento, estos sistemas suelen representarse mediante ecuaciones diferenciales no lineales. Para ello se tendrá en cuenta el concepto de resistencia y capacitancia con el fin de describir las características dinámicas del sistema de forma sencilla.

Para la medición del nivel se debe tener en cuenta que la medición puede ser de varios tipos: por medida directa de la altura del líquido en el tanque con relación a una línea de referencia, por la medida de la presión hidrostática, por el desplazamiento producido en un flotador y por el propio líquido o aprovechando las características eléctricas del líquido.

Para medir el nivel del tanque en este proyecto se tendrá en cuenta que se trata de tanques cerrados y a presión. Por esta razón, una medición simple de presión hidrostática no se puede usar. La influencia de la presión en un tanque cerrado incluye: el peso o presión del líquido y la presión o el vacío ejercidos encima de la superficie del líquido.

#### 6. MEDICION DE LA PRESION

Existen muchas razones por las cuales en un determinado proceso se debe medir presión. Entre estas se tienen: Calidad del producto, la cual frecuentemente depende de ciertas presiones que se deben mantener en un proceso; Por seguridad, como por ejemplo, en recipientes donde la presión no debe exceder un valor máximo dado por las especificaciones del diseño; En aplicaciones de medición de nivel; en aplicaciones de medición de flujo. Las razones por las cuales se medirá la presión en este proyecto son las expuestas anteriormente, puesto que se trata de tanques

cerrados en donde por medio del proceso de biodigestión anaerobia se producirán gases. Para este proyecto, se utilizaron transductores piezoresistivos debido a las características que estos presentan y las ventajas que nos ofrecen con respecto a las características del sistema a implementar.

La piezoelectricidad se define como la producción de un potencial eléctrico debido a la presión sobre ciertas sustancias cristalinas como el cuarzo, titanato de bario, etc. En un sensor piezoeléctrico la presión aplicada sobre varios cristales produce una deformación elástica.

## 7. MEDICION DEL pH

El control de pH es un problema muy importante en muchos procesos. La importancia del pH en el proceso de biodigestión anaeróbica radica en la estimación de las fases de este proceso. Cuando el pH es ácido, se favorece la tasa de crecimiento de los microorganismos hidrolíticos y acidogénicos y por consiguiente un buen desempeño en la etapa acidogénica mediante la degradación de la materia orgánica a ácidos grasos volátiles, con un pH básico, se favorece el crecimiento de los microorganismos metanogénicos ya que actúan sobre los ácidos grasos volátiles provenientes de la etapa acidogénica para obtener el biogás. En la etapa metanogénica una disminución del pH lleva a que el metabolismo de las bacterias metanogénicas se reduzca generando acumulaciones de ácidos grasos volátiles.

A mayor estabilidad de pH, la producción de metano, aumenta pronunciadamente permitiendo que las bacterias metanogénicas puedan consumir los ácidos grasos volátiles presentes.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, resulta un factor importante la medición del pH, pues de éste depende notablemente el proceso de biodigestión anaerobia, por ello la selección adecuada del instrumento de medición juega un papel fundamental.

## 8. CONCLUSIONES

La selección adecuada de los Instrumentos de medición permite en gran parte asegurar el óptimo funcionamiento de la planta, puesto que al mantener una buena medición de las variables,

permite tener un control óptimo del proceso, más fácil y confiable en la toma de decisiones.

Un sistema de control exige fundamental de cuatro partes: el proceso, la unidad de medida, la unidad de control y el elemento final de control. La unidad de medida juega un papel importante en el sistema, ya que mediante ésta se adquiere un conocimiento del estado del proceso, para que la unidad de control actúe y tome decisiones frente al proceso.

En el proceso de biodigestión anaerobia resulta de gran importancia el monitoreo y control de las variables que intervienen en este proceso, puesto que estas variables están unidas inevitablemente en la estabilidad del proceso en general. Como se mencionó anteriormente, una disminución o un aumento de pH, presión, temperatura, etc., afectan directamente el metabolismo de las bacterias que intervienen en el proceso, afectando directamente la calidad del producto final (biogás y bioabono).

## REFERENCIAS

- Arteaga C, Y., Carballo A, L., Márquez M, F., Urbáez M, C. *Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás*. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Facultad de Forestal y Agronomía. Departamento de Química, Pinar del Río, Cuba.
- Arenas, L., Castillo A, J., Castillo M, E., Cristancho, D., Hernández, M., Luna, H., Martínez, A., Sandoval, C., Vergara, M. *Digestión Anaerobia: Una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos urbanos*. Universidad Industrial de Santander. Centro de estudios e investigaciones ambientales. Colombia, 2007.
- Bedoya, J. C. *Diseño de la automatización de una planta generadora de Biogás*. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico. Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia, 2006.
- Bustillos P, O. *Instrumentación Industrial*. Universidad de Oriente. Escuela de ingeniería y ciencias aplicadas. Departamento de eléctrica. Postgrado en ingeniería eléctrica. Especialización en automatización e Informática industrial. Puerto la cruz, 2001.
- Doran, P M. *Principios de ingeniería de los bioprocesos*. Academic Press Limited. Editorial Acribia, S.A. España, 1998.

- Gastelbondo B, Walter. *Ingeniería para la construcción de procesos de capacidad simple para el desarrollo de métodos de detección y diagnóstico de fallas*. Universidad de Pamplona. Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas IIDTA. Grupo de Automatización y Control. Pamplona, Colombia, 2005.
- Landeros P, E., Martí M, J., Saavedra L, M., Ruíz F, G., Chamy, R., Pulgar, L. *Modelación operacional de digestores en planta de tratamiento de aguas servidas*. Grupo Aguas y Escuela de Ingeniería Bioquímica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile, 2006.
- Lay, J., Li, Y., Noyke, T. "The Influence of pH and Ammonia Concentration on the Methane Production in High-Solids Digestion Processes". *Water Environment Research*, Vol. 50, No. 5, Julio/Agosto (1998).
- Ogata, K. *Ingeniería de Control Moderna*. University of Minnesota. Segunda Edición. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México, 1993.

**STUDY OF RAIL VEHICLE DYNAMICS IN CURVED TRACKS.  
PART I: WHEEL-RAIL CONTACT ANALYSIS****ESTUDIO DE LA DINAMICA DE VEHICULOS FERROVIARIOS EN TRAMOS  
CURVOS. PARTE I: ANALISIS DEL CONTACTO RUEDA-CARRIL****PhD(c). Jesús Otero Yugat****Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)**, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Avenida Diagonal, 647. Barcelona, España  
E-mail: [jesus.otero-yugat@upc.edu](mailto:jesus.otero-yugat@upc.edu)

**Abstract:** The present paper outlines the different methodologies used to analyze the dynamics of rail vehicles in curved tracks. The modelling of wheel-rail contact includes the study of the status of normal, longitudinal and tangential forces based on nonlinear hertzian contact theory and Kalker's theory. Generally, the rail vehicle is considered as a set of overlapping rigid bodies, linked to each other by elastic systems and shock absorbers which have performance characteristics correctly defined. Additionally, a comparison between the conventional theories and the formulation based on multibody dynamics is exposed.

**Resumen:** El presente trabajo esboza las diferentes metodologías empleadas para el análisis de la dinámica de vehículos ferroviarios en tramos curvos. La modelización del contacto rueda-carril incluye el estudio del estado de fuerzas normales, longitudinales y tangenciales basado en la teoría no lineal de Hertz y en la teoría de Kalker. Generalmente, el vehículo ferroviario es considerado como un conjunto de masas superpuestas rígidas, ligadas entre sí por sistemas elásticos y amortiguadores que poseen características de funcionamiento bien definidas. Adicionalmente, se expone una comparación entre las teorías convencionales y la formulación basada en la dinámica de sistemas multicuerpo.

**Keywords:** Wheel-rail contact, nonlinear hertzian contact theory, Kalker's theory, multibody dynamics.

**1. INTRODUCCION**

Una red ferroviaria metropolitana se configura principalmente en torno a las líneas que enlazan los núcleos más importantes de la población, así como también a través de los itinerarios que permiten conectar las diferentes localidades de la ciudad. El paso de un tren suburbano produce varios efectos que abarcan desde la generación de vibraciones hasta su transmisión al entorno, provocando así molestias en las zonas aledañas a la vía.

El origen de las vibraciones provocadas por el contacto rueda-carril, se encuentra en las irregularidades de perfil que presentan tanto la rueda como el carril [1]. Entre las posibles irregularidades de la rueda destacan los planos provocados por maniobras de frenado, los cuales representan cambios bruscos de perfil, y por tanto fluctuaciones importantes en la fuerza de contacto.

En el diseño de tramos ferroviarios es de especial interés el estudio de dos aspectos dinámicos del



sistema rueda-carril, como son la estabilidad del movimiento lateral y el comportamiento en curva. En tal sentido, se han desarrollado diferentes investigaciones orientadas a este tipo de análisis, basadas en las teorías convencionales cuya aplicación ofrece resultados aceptables. No obstante, dada la rápida evolución de las técnicas computacionales, ha sido posible la generación de programas fundamentados en la dinámica de sistemas multicuerpo, que simulan el movimiento de trenes que se desplazan a lo largo de vías con geometría arbitraria.

Los modelos clásicos emplean dos postulados concretos: la teoría no lineal de Hertz para el análisis del contacto vertical, y la teoría de Kalker para idealizar el problema tangencial y longitudinal. Por su parte, en la dinámica de sistemas multicuerpo se utilizan conjuntos de coordenadas referidas a sistemas globales e inerciales de referencia [2], en vez de coordenadas referidas a ejes móviles tal como se usa en los modelos convencionales de dinámica de coches ferroviarios.

Ambas alternativas de estudio permiten analizar correctamente la generación de fuerzas derivadas del contacto rueda-carril, las cuales se transmiten a la base de la vía, y de allí se propagan hacia el entorno del entramado suburbano.

## 2. MODELIZACION DE LA FUERZA NORMAL DE CONTACTO

Parte del análisis del contacto rueda-carril, hace referencia a la fuerza normal que se produce debido a la interacción entre ambos. Se han propuesto diversas formulaciones que permiten describir dicha fuerza, entre ellas cabe mencionar la teoría de contacto no lineal de Hertz, que permite relacionar el desplazamiento vertical de la rueda, con el perfil de rugosidad de la misma y el desplazamiento vertical del carril. La relación se establece mediante un muelle de elasticidad no lineal de constante  $K_H$ , según se muestra en la Figura 1.

La obtención de  $K_H$ , se realiza a partir de un análisis de los radios de curvatura presentes tanto en la vista lateral como frontal de la zona de contacto, según se muestra en la Figura 2, siendo  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R'_1$ ,  $R'_2$ , los citados radios de curvatura.

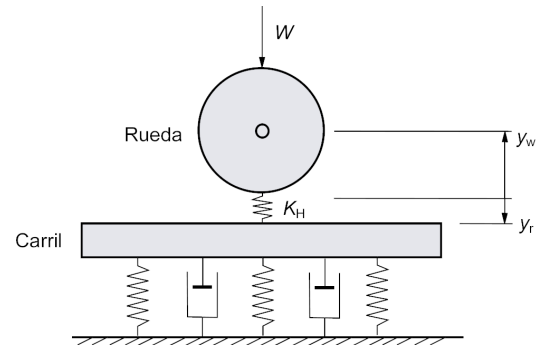


Fig. 1. Esquematización del contacto normal  
rueda-carril

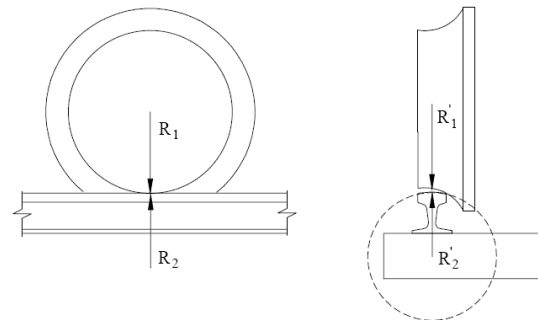


Fig. 2. Vista frontal y lateral de la zona de  
contacto rueda-carril

$R_1$  representa el radio principal de rodadura de la rueda,  $R_2$  es el radio principal de curvatura del carril en el punto de contacto,  $R'_1$  es el radio de curvatura transversal del perfil de la rueda en el punto de contacto, y  $R'_2$  es el radio de curvatura transversal del perfil del carril en el punto de contacto. Algunos autores [3] han utilizado formulaciones concretas para determinar los coeficientes geométricos  $k_1$  y  $k_2$ , que dependen de tales radios de curvatura; las mismas se representan respectivamente por medio de la Ecuación 1 y 2,

$$k_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2} \right) \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right)^2 + 2 \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \cos 2q \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Siendo  $q$  el ángulo de inclinación existente entre el plano que contiene la curvatura principal del carril y el plano con la curvatura principal de la rueda. Se define el coeficiente  $k_3$  relacionado con las propiedades del material, y dependiente del módulo de Young  $E$  y del ratio de Poisson  $\nu$  de la rueda y del carril, según la Ecuación 3.

$$k_3 = \frac{1-v^2}{E}; \quad \Phi = \arccos \frac{k_2}{k_1} \quad (3)$$

A partir de los coeficientes geométricos  $k_1$  y  $k_2$ , es posible hallar en tablas específicas [4] los parámetros de cálculo  $m$ ,  $n$  y  $I$  basados en el ángulo  $\Phi$  formado a partir de los planos asociados al carril y a la rueda. De esta forma, se pueden determinar las dimensiones  $a$  y  $b$  del área elíptica de contacto rueda-carril, atendiendo a la Ecuación 4, donde  $W$  es la carga estática presente en la zona de interacción, equivalente al aporte del peso de un vagón sobre una rueda.

$$a = m \left( \frac{3pk_3W}{2k_1} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad b = n \left( \frac{3pk_3W}{2k_1} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Sobre la base de lo anterior, la constante de elasticidad no lineal  $K_H$ , se puede describir por medio de la Ecuación 5.

$$K_H = \frac{4}{3k_3} \sqrt{\frac{2}{k_1 I^3}} \quad (5)$$

Diversas investigaciones [1, 3] han utilizado la teoría no lineal de Hertz basándose en las siguientes hipótesis: el comportamiento de los cuerpos que interaccionan es elástico, los radios de curvatura son significativamente mayores a las dimensiones del área elíptica de contacto, y las curvaturas dentro de la zona de contacto son constantes. A partir de dichas hipótesis se ha formulado la fuerza de contacto rueda-carril mediante lo expresado en la Ecuación 6, donde  $y_c$  representa el desplazamiento vertical del carril,  $y_r$  el desplazamiento vertical de la rueda,  $r$  el radio de la rueda y  $e$  el perfil de irregularidad de la misma.

$$F = \begin{cases} K_H d^{3/2} & d = y_c - y_r + r - e(t) > 0 \\ 0 & d = y_c - y_r + r - e(t) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Un estudio reciente [5] ha permitido conocer los alcances y la viabilidad de la aplicación de esta teoría de contacto; dicha investigación incluye diversas posiciones relativas entre la rueda y el carril, con sus respectivas áreas de contacto originadas de acuerdo a tales posiciones. Por medio del empleo de recursos computacionales y de la metodología de elementos finitos, se han realizado cálculos numéricos de las distribuciones de la presión de contacto, obteniendo que la teoría de Hertz ofrece resultados próximos a la realidad, si la zona de contacto se encuentra enmarcada dentro del perfil del carril.

### 3. MODELADO DE LA DINAMICA TANGENCIAL Y LONGITUDINAL

El bastidor de un bogie está fuertemente relacionado con el cuerpo de un vagón a través de los elementos que conforman la suspensión [6]. Tales vínculos generan en la zona de contacto rueda-carril, fuerzas significativas cuando un tren circula a través de los tramos curvos de una vía, denotadas como  $F_x$  para el caso de las fuerzas longitudinales y  $F_y$  para las laterales, representadas en el plano  $OY$  de la vía según la Figura 3.

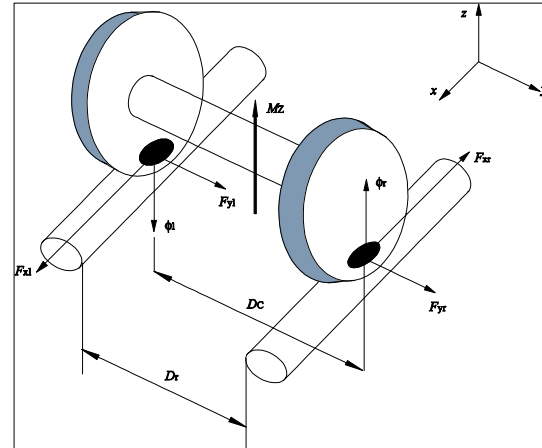


Fig. 3. Dinámica lateral y longitudinal del contacto rueda-carril

Los subíndices  $l$  y  $r$  hacen referencia respectivamente a aquellas fuerzas originadas en el carril izquierdo y en el derecho. Las fuerzas longitudinales actuantes en cada zona de contacto se encuentran separadas por la distancia de contacto  $D_c$  entre carriles, produciendo un momento de enlace  $M_z$  respecto al eje normal al carril, visto en cada uno de los ejes del bogie y reflejado por medio de la Ecuación 7.

$$M_z = F_{xr} \frac{D_c}{2} + F_{xl} \frac{D_c}{2} \quad (7)$$

Para el caso de una interacción rueda-carril no lineal de Hertz, estas fuerzas dependen de las velocidades relativas entre los dos cuerpos en contacto. No obstante, Kalker [7] ha planteado expresiones generales que permiten determinar dichas fuerzas, teniendo en cuenta diversos coeficientes de rigidez  $c_{ij}$  asociados para cada caso, así como también el módulo de rigidez del material  $G$ , y las dimensiones  $a$  y  $b$  del área elíptica de contacto. Las ecuaciones 8 y 9 muestran las formulaciones que conllevan respectivamente al cálculo de la fuerza longitudinal, de la fuerza tangencial y de la fuerza por deslizamiento  $F_{spin}$ .

$$F_x = -Gabc_{11}v_x; \quad F_y = -Gabc_{22}v_y \quad (8)$$

$$F_{\text{spin}} = -Ga^{3/2}b^{3/2}c_{23}\mathbf{j} \quad (9)$$

Siendo  $v_x$ ,  $v_y$  y  $\mathbf{j}$ , los pseudodeslizamientos en las direcciones longitudinal, lateral y de deslizamiento. No obstante, algunos autores [8] han simplificado y linealizado las formulaciones previamente mostradas a través del arreglo matricial mostrado en la Ecuación 10, donde  $M_j$  es el momento derivado de la fuerza provocada por deslizamiento

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_j \end{Bmatrix} = -Gab \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & \sqrt{abc_{23}} \\ 0 & -\sqrt{abc_{23}} & abc_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ \mathbf{j} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

De manera análoga a la situación existente en el análisis de la fuerza vertical de contacto, la teoría lineal de Kalker ofrece resultados coherentes y aceptables para cuando el deslizamiento de la rueda es muy pequeño; en caso contrario, el arreglo arriba especificado deja de ser viable en virtud de que no se incluye el efecto de la saturación de las fuerzas originadas por la fricción.

Si se desea considerar las consecuencias originadas por la fuerza de roce y obtener resultados cercanos a los provenientes de la formulación no lineal, se ha propuesto un procedimiento heurístico que se inicia a partir del estado de fuerzas presente tanto en la dirección longitudinal como lateral, establecido por medio del modelo linealizado de Kalker previamente detallado. Para ello, se calcula la fuerza equivalente  $F_u$  atendiendo a lo señalado por la Ecuación 11.

$$F_u = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta esta fuerza de arrastre equivalente, se establece una comparación con respecto a la fuerza de enlace límite que garantiza el no deslizamiento, calculada mediante la fuerza normal de contacto  $F$  y el coeficiente de fricción  $m$ , con la finalidad de establecer el valor de la fuerza de arrastre  $F'_u$  que se obtendría de aplicar la teoría no lineal de Kalker. La mencionada comparación debe seguir el criterio estipulado en la Ecuación 12.

$$F'_u = \begin{cases} mF \left[ \left( \frac{F_u}{mF} \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{F_u}{mF} \right)^2 \right] & F_u \leq 3mF \\ mF & F_u > 3mF \end{cases} \quad (12)$$

Con esta nueva fuerza, se corrige el valor de las fuerzas longitudinal y tangencial de acuerdo a lo fijado por la Ecuación 13, a fin de que se aproximen a lo que realmente se adquiriría de utilizar la formulación no lineal.

$$F'_x = \frac{F'_u}{F_u} F_x; \quad F'_y = \frac{F'_u}{F_u} F_y \quad (13)$$

Esta aproximación ofrece resultados más cercanos a la realidad del estado dinámico tangencial y longitudinal de una rueda que se desplaza sobre un tramo curvo; sin embargo no toma en consideración el momento causado por la fuerza de arrastre por deslizamiento. En este sentido, Polach [9] ha diseñado un algoritmo de cálculo que permite hallar las componentes lateral y longitudinal de la fuerza de arrastre, teniendo presente los efectos del deslizamiento. Dicho algoritmo se fundamenta a la teoría no lineal de Kalker y atiende a lo establecido en la Ecuación 14,

$$F'_x = F_F \frac{u_x}{u_c}; \quad F'_y = F_F \frac{u_y}{u_c} + F_{\text{spin}} \frac{\mathbf{j}}{u_c} \quad (14)$$

Donde  $F_F$  es la fuerza de contacto tangencial causada por el fenómeno de arrastre en la dirección longitudinal y lateral, mientras que  $u_c$  es un parámetro que define los efectos del arrastre por deslizamiento. A pesar de que este método permite simplificar la formulación no lineal de la dinámica tangencial, presenta el inconveniente de que necesita conocer las condiciones iniciales vinculadas con los desplazamientos  $v_x$ ,  $v_y$  y  $\mathbf{j}$ .

Por otra parte, el trabajo llevado a cabo por [10] ha formulado una teoría tridimensional asociada a un espacio en forma elíptica, adaptable al área de contacto rueda-carril. La superficie de contacto se divide en dos regiones elípticas asimétricas: una de deslizamiento y otra de adhesión, tal como se muestra en la Figura 4.

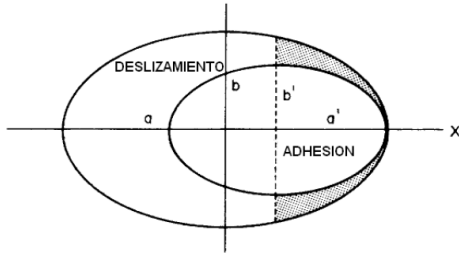


Fig. 4. Elipse de adhesión y deslizamiento según [10]

Se observa que el eje axial de la elipse de adhesión coincide con el eje axial de la elipse de la zona de contacto, y que ambas elipses se tocan en su punto más extremo. Sin embargo, este postulado tiene una limitación importante basada en el hecho de que no tiene en cuenta el efecto del giro, por lo que su uso está restringido en la situación en que exista giro, es decir, se tengan pseudodeslizamientos longitudinal y transversal puros.

#### 4. MODELADO BASADO EN LA DINÁMICA DE SISTEMAS MULTICUERPO

Mediante el modelado por sistemas multicuerpo, es posible proyectar las ecuaciones de movimiento del sistema ferroviario, de tal forma que se obtengan los movimientos estacionarios en vías curvas como puntos de equilibrio, simplificando de esta manera la determinación de dichos movimientos. Según lo expuesto en [2, 11, 12] las ecuaciones de movimiento de un vehículo ferroviario vienen establecidas por la Ecuación 15.

$$M(q)\ddot{q} + C_q^T(q, t)I = Q_v(q, \dot{q}) + Q_{ext}(q, \dot{q}) \quad (15)$$

$$C(q, t) = 0$$

donde  $q = [r^w, q^w]^T$  es el vector de coordenadas generalizadas que contiene las posiciones y orientaciones de los sistemas de referencia asociados a los sólidos que forman el coche del tren con respecto al sistema global de coordenadas,  $M$  es la matriz de inercia,  $C$  es el vector de restricciones cinemáticas vinculadas con pares cinemáticos, la velocidad de avance del ferrocarril y a los parámetros de Euler  $q^w$ ,  $C_q$  es la matriz jacobiana de tales restricciones con respecto al vector de coordenadas generalizadas,  $I$  es el vector de multiplicadores de Langrange asociados a las restricciones cinemáticas,  $Q_v$  es el vector de fuerzas de inercia cuadráticas de velocidad, y  $Q_{ext}$  es el vector de fuerzas externas generalizadas que incluye el peso del vehículo, las fuerzas normales

de contacto, y las fuerzas y momentos tangenciales de contacto.

Las ecuaciones de movimiento pueden ser usadas para el análisis del desplazamiento de un eje ferroviario en cualquier tipo de vía, empleando la teoría no lineal de Kalker [7] para determinar las fuerzas laterales y longitudinales de contacto, y un método elástico para el cálculo de las fuerzas normales de contacto [11, 12]. El análisis se realiza por medio del uso de coordenadas concretadas con respecto a un sistema de referencia móvil que avanza a lo largo de la vía, igual al especificado en la Figura 5.

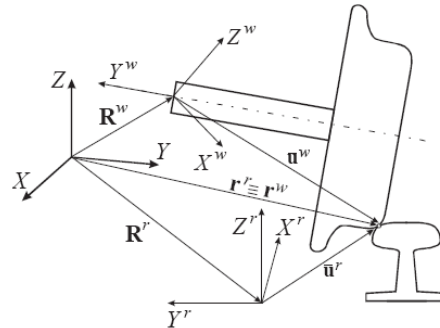


Fig. 5. Coordenadas empleadas en el modelo basado en la dinámica de sistemas multicuerpo de acuerdo a [11]

Las nuevas coordenadas son constantes en su mayoría para cualquier movimiento estacionario, por lo que es necesaria una doble transformación de coordenadas, para convertir el sistema de la Ecuación 15 en un sistema de ecuaciones algebraicas de sencilla solución, para obtener dichos movimientos estacionarios y su estabilidad. De esta forma se origina un vector de coordenadas generalizadas  $z = [r^w, q^w, g]^T$ , en el que el vector de parámetros de Euler  $q^w$  describe la orientación del sistema de referencia intermedio con respecto al de la vía, mientras que el ángulo  $g$  es el formado en todo instante entre el sistema de referencia del eje y el intermedio.

En vista de que la posición y orientación del sistema de referencia de la vía viene dada en función del tiempo, es posible realizar la doble transformación, modificando la Ecuación 15 para obtener la formulación de movimiento escrita en términos de las nuevas coordenadas y proyectadas en el sistema de referencia móvil, atendiendo a lo reflejado en la Ecuación 16.

$$M(z)\ddot{q}(z, \dot{z}, \ddot{z}) + C_q^T(z, t)I = Q_v(z, \dot{z}) + Q_{ext}(z, \dot{z}); \quad (16)$$

$$C(z, t) = 0$$

La expresión anterior permite precisar la dinámica del sistema ferroviario. Mediante la misma, es posible incluir los parámetros de inercia, rigidez y amortiguamiento de las suspensiones primaria y secundaria del bogie del coche, además de variar la geometría de la rueda y el perfil del carril en función de las características de la vía y del tren.

Sin embargo, el uso de un modelo de sistemas multicuerpo está destinado al estudio del estado dinámico entre la rueda y el carril, permitiendo así estudiar la evolución de las fuerzas tridimensionales actuantes al paso de un tren; por consiguiente, si se desea analizar parámetros como el desgaste de la cabeza del carril o de la periferia de la rueda, la influencia del perfil de irregularidad de la rueda en la generación de vibraciones, o la presencia de planos en la misma, los sistemas multicuerpos se vuelven complejos e inviables en el ámbito computacional. En consecuencia, las teorías convencionales son una alternativa correcta que ofrece predicciones cercanas al comportamiento dinámico y vibratorio del equipamiento ferroviario al paso de un tren.

## 5. CONCLUSIONES

Se han esquematizado las principales teorías y formulaciones empleadas en el modelo de la dinámica de contacto rueda-carril, analizando sus respectivos alcances y aplicabilidad.

Los modelos clásicos utilizados para analizar la dinámica del contacto rueda-carril, poseen el objetivo concreto de estimar la vibración de un punto del carril al paso de un ferrocarril metropolitano, con diferentes características en la superficie de sus ruedas.

Al estar el problema lateral y longitudinal de contacto estrechamente relacionado con el estado dinámico normal, el cálculo de las fuerzas tridimensionales motivadas al contacto rueda-carril se debe realizar de manera simultánea, acoplando las ecuaciones establecidas por las teorías convencionales detalladas.

El método de análisis dinámico de vehículos ferroviarios basado en las ecuaciones de sistemas

multicuerpo, permite un análisis eficiente de la estabilidad de un vagón en vías curvas, pero no representan una opción viable en el momento de estudiar la dinámica vibratoria derivada del contacto rueda-carril.

## REFERENCIAS

- [1] Wu, T.X., Thompson, D.J. *A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats*. Journal of Sound and Vibration 251(1), 2002, pp. 115 – 139.
- [2] Shabana, A.A., Berzeri, M., Sany, J.R. *Numerical procedure for the simulation of wheel/rail contact dynamics*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 123(2), 2001, pp. 168 – 178.
- [3] Thompson, D.J., Monk-Steel, A.D., Jones, C.J.C., Allen, P.D., Hsu, S.S., Iwnicki, S.D. *Railway Noise: Curve Squeal, Roughness Growth, Friction and Wear*. Rail Research UK, 2003, pp. 1 – 51.
- [4] Norton, R.L. *Diseño de máquinas*. Primera Edición. Prentice Hall. 1999.
- [5] Yan, W., Fischer, F.D. *Applicability of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems*. Archive of Applied Mechanics 70, 2000, pp. 255 – 268.
- [6] Iwnicki, S.D. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Taylor and Francis Group. 2006.
- [7] Kalker, J.J. *Three dimensional elastic bodies in rolling contact*. Kluwer Academic, Dordrecht, 1990.
- [8] Pombo, J., Ambrósio, J., Silva, M. *A new wheel-rail contact model for railway dynamics*. Vehicle System Dynamics. 45(2), 2007, pp. 165 – 189.
- [9] Polach, O. *A fast wheel-rail forces calculation computer code*. Vehicle System Dynamics Supplement. 33, 1999, pp. 728 – 739.
- [10] Johnson, K.L., Vermeulen, P.J. *Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces*. Journal of Applied Mechanics Science. 31, 1964, pp 338 – 340.
- [11] Shabana, A.A., Zaazaa, K.E., Escalona, J.L., Sany, J.R. *Development of elastic force model for wheel/rail contact models*. Journal of Sound and Vibration 269(1), 2004, pp. 295 – 325.
- [12] Shabana, A.A., Tobaa, M., Sugiyama, H., Zaazaa, K.E. *On the computer formulations of the wheel/rail contact problem*. Nonlinear Dynamics 40(2), 2005, pp. 169 – 193.



**STUDY OF RAIL VEHICLE DYNAMICS IN CURVED TRACKS.  
PART II: TRANSVERSE STABILITY OF THE COACH****ESTUDIO DE LA DINAMICA DE VEHICULOS FERROVIARIOS EN TRAMOS  
CURVOS. PARTE II: ESTABILIDAD TRANSVERSAL DEL VAGON****PhD(c). Jesús Otero Yugat****Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)**, Departamento de Ingeniería Mecánica  
Avenida Diagonal, 647. Barcelona, España  
E-mail: [jesus.otero-yugat@upc.edu](mailto:jesus.otero-yugat@upc.edu)

**Abstract:** Experience shows that, from a certain speed, a railway vehicle running in a curved track becomes unstable. In the case of the transverse union between the body of the coach and the bogie, such instability is characterized by a violent movement of the bogies, resulting in the wheel-rail contact zone important cross and normal forces, which may cause the derailment of the train. This article summarizes the theoretical and experimental analysis associated with the instability of a railway vehicle in curved tracks, with special emphasis on its dynamic and vibrating behavior.

**Resumen:** La experiencia muestra que, a partir de una cierta velocidad, un vehículo ferroviario circulando por una vía curva se vuelve inestable. En el caso de la unión transversal entre el cuerpo del vagón y el bogie, dicha inestabilidad está caracterizada por un movimiento violento de los bogies, produciendo en la zona de contacto rueda-carril fuerzas transversales y normales importantes, que pueden provocar el descarrilamiento del tren. El presente artículo sintetiza los fundamentos teóricos y experimentales asociados al análisis de la inestabilidad de un ferrocarril en tramos curvos, haciendo especial énfasis en su comportamiento dinámico y vibratorio.

**Keywords:** Instability, wheel-rail contact, cross and normal forces.

**1. INTRODUCCION**

Un sistema metropolitano suburbano consta de un conjunto formado por infraestructuras ferroviarias en las que se incluyen las instalaciones fijas como el carril y las fijaciones, y por el material rodante concebido para recorrer dichas infraestructuras. La velocidad a la cual comienza a aparecer el fenómeno de inestabilidad en dicho material rodante, se conoce como velocidad crítica y delimita la máxima velocidad que puede alcanzar con seguridad total el tren.

En tales condiciones, el estudio de la estabilidad transversal de un ferrocarril a velocidades moderadas, se puede reducir con precisión a la disertación particular de un bogie [1].

En régimen estable y sobre un tramo recto de vía en óptimas condiciones, la frecuencia de lazo cinemático de un bogie con rotación débilmente amortiguada, crece linealmente con la velocidad.

No obstante, en el caso de circulación en curvas con insuficiencia de peralte, los ejes se apoyan en

el hilo exterior [2], por lo que el guiado se efectúa por medio del mismo y bajo la influencia de los defectos de alineación, motivados principalmente por el perfil de irregularidad de la cabeza del carril.

El modelado del bogie y de las suspensiones primaria y secundaria, se realiza mediante hipótesis de linealidad que abarcan la consideración de pequeños desplazamientos de masas alrededor de sus posiciones de equilibrio en reposo o en régimen permanente [2, 3].

En consecuencia, es posible adecuar los parámetros de las suspensiones en cuanto a rigidez y amortiguamiento, atendiendo a la velocidad de desplazamiento del vagón, con la finalidad de conocer la influencia de las propiedades de cada suspensión en la estabilidad general del bogie.

## 2. DINAMICA VIBRATORIA DEL VEHICULO FERROVIARIO EN CURVAS

La Figura 1 representa la vista lateral del cuerpo de un coche ferroviario que circula en un tramo curvo, mientras que la Figura 2 muestra la vista frontal del mismo vagón, oscilando sobre dos sistemas elásticos amortiguados y con masas intermedias.

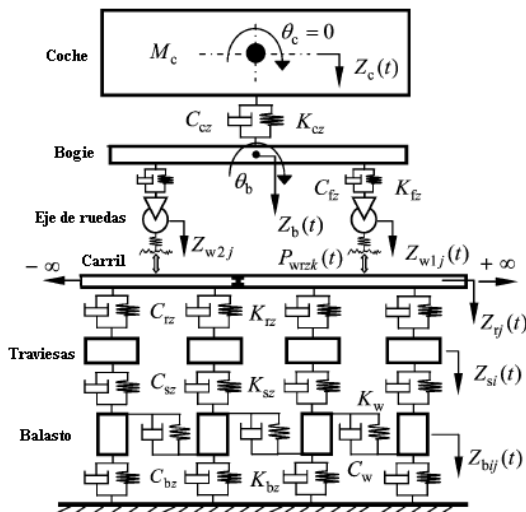


Fig. 1. Vista lateral del vagón en tramos curvos

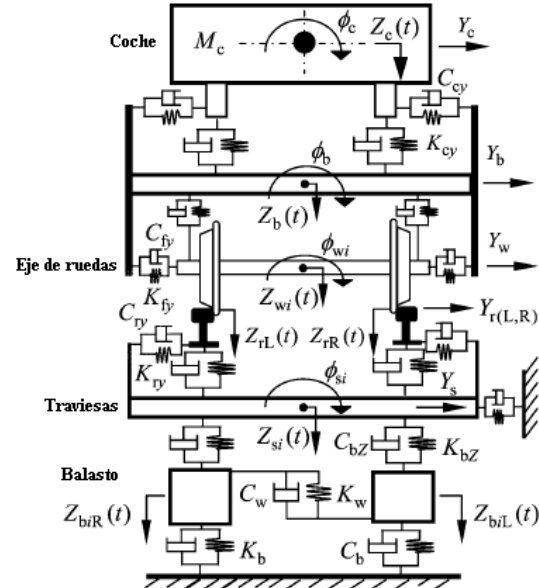


Fig. 2. Vista frontal del vagón en tramos curvos

Teniendo en cuenta las propiedades de simetría, y condiciones de linealidad en las diferentes suspensiones del modelo, las ecuaciones de movimiento lateral, vertical y angular para la mitad del vehículo ferroviario, vienen dadas por las expresiones siguientes:

$$M_C \left( \ddot{Z}_C - a_0 \ddot{f}_{\text{sec}} - \frac{v_0^2}{R_C} \right) = -F_{zL} - F_{zR} + M_C g \quad (1)$$

$$M_C \left( \ddot{Y}_C + H_C \ddot{f}_{\text{sec}} + \frac{v_0^2}{R_C} \right) = F_{yL} + F_{yR} + M_C g \ddot{f}_{\text{sec}} \quad (2)$$

$$I_{C_x} (\ddot{f}_{\text{sec}} + \ddot{f}_c) = d_c (F_{zL} - F_{zR}) - H_B (F_{yL} - F_{yR}) \quad (3)$$

Donde  $M_C$  es la masa efectiva del vagón,  $\ddot{Z}_C$  e  $\ddot{Y}_C$  son las aceleraciones vertical y lateral del centro de inercia del mismo,  $\ddot{f}_c$  es la aceleración del desplazamiento angular del vagón,  $\ddot{f}_{\text{sec}}$  es la deflexión angular causada por la elevación del vehículo ferroviario al circular en tramos curvos,  $v_0$  es la velocidad del tren,  $H_C$  es la altura comprendida entre el centro de inercia del vagón y el punto de contacto rueda-carril,  $H_B$  es la altura presente entre el centro de inercia y la suspensión secundaria,  $d_c$  es la distancia entre las dos suspensiones secundarias,  $I_{C_x}$  es el momento de inercia del coche,  $R_C$  es el radio de curvatura de la vía,  $a_0$  es la distancia horizontal entre las dos zonas de contacto rueda-carril, mientras que  $F_{zL}$ ,  $F_{zR}$ ,  $F_{yL}$  y  $F_{yR}$ , son las fuerzas de enlace vertical y lateral entre el cuerpo del vagón y el bogie.

Los bogies son centros de percusión recíprocos el uno del otro [4], por consiguiente si se considera que una excitación externa afecta la dinámica vertical del sistema, como por ejemplo un plano de rueda, el paso por una encrucijada de vía, o bien una irregularidad severa en la rueda o en la cabeza del carril, se tiene que una perturbación cualquiera sobre el movimiento vertical de uno de ellos no tiene ninguna repercusión sobre el otro. Bajo estas condiciones, los modos propios de vibración se obtienen a partir del cálculo de los valores propios de la matriz dinámica  $D$  descrita en la Ecuación 4.

$$D^{-1} = M^{-1}K^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{k_{cz} + k_{fz}}{M_c} & -\frac{k_{fz}}{M_c} \\ -\frac{k_{fz}}{m_{\text{bogie}}} & \frac{k_{fz}}{m_{\text{bogie}}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dada la alta inercia y masa del vagón, generalmente se determinan frecuencias propias relativamente bajas, del orden de 1 Hz para el primero y de 5 Hz para el segundo modo propio, siendo el confort vertical en tramos curvos, dependiente de estos parámetros. Adicionalmente, basándose en el fuerte acoplamiento existente entre las ruedas y la vía, debido a la carga vertical soportada por los ejes, el mencionado confort está supeditado a la función de transferencia que caracteriza la suspensión vertical, y al espectro de densidad de potencia de los defectos de nivelación de los dos hilos de carriles.

Respecto a los movimientos transversales del vagón, cabe acotar que en alineación sobre una vía de buena calidad, dichos movimientos dependen esencialmente de las características constructivas de los bogies, mientras que en curva los mismos están influenciados por los defectos de alineación del hilo exterior. En la dirección transversal, durante la circulación en tramos curvos se producen oscilaciones libres, motivadas principalmente por los movimientos de balanceo  $\bar{q}$  y de choque lateral  $\bar{Y}$ , los cuales se encuentran acoplados, debido únicamente a la separación del plano de suspensión transversal con relación al centro de inercia del vagón. En consecuencia, las frecuencias propias acopladas del sistema formado por el balanceo y el choque lateral, se determinan mediante la formulación bicuadrática de la Ecuación 5.

$$\mathbf{w}^4 - \left( \mathbf{w}_1^2 + \mathbf{w}_2^2 \right) \left( \frac{r_x^2 + h_0^2}{r_x^2} \right) - \frac{2\mathbf{w}_1^2 h_0 (h_0 - h)}{r_x^2} \mathbf{w}^2 + \left( \mathbf{w}_1^2 \mathbf{w}_2^2 \left( \frac{r_x^2 - h_0^2}{r_x^2} \right) - \frac{\mathbf{w}_1^4 (h_0 - h)^2}{r_x^2} \right) = 0 \quad (5)$$

Donde  $r_x$  es el radio de giro respecto al eje horizontal que pasa por el centro de inercia del vagón,  $h_0$  es la separación del plano de suspensión transversal en relación al centro de inercia,  $h$  es la distancia definida entre dicho centro y el plano delimitado por la suspensión lateral, mientras que  $\mathbf{w}_1$  y  $\mathbf{w}_2$  se pueden hallar por medio de las expresiones siguientes:

$$\mathbf{w}_1^2 = \frac{4k_{cy}}{M_c} \quad (6)$$

$$\mathbf{w}_2^2 = \frac{4k_{cz}d^2 + 4k_{cy}(h - h_0)^2 - M_c g h_0}{M_c (r_x^2 + h_0^2)} \quad (7)$$

siendo  $d$  la distancia de separación transversal entre las suspensiones laterales del bogie. Sobre la base de las generalizaciones anteriores, los modos propios  $\Omega_1$  y  $\Omega_2$ , que identifican el conjunto constituido por el balanceo y el choque lateral, se calculan a través de la Ecuación 5; mientras que el tercer modo  $\Omega_3$  asociado a la frecuencia propia del lazo del vagón, se obtiene a partir de la Ecuación 8, en la cual  $a$  representa la distancia entre los pivotes de los bogies, y  $r_z$  es el radio de giro respecto al eje vertical que pasa por el centro de inercia del vagón.

$$\Omega_3^2 = \frac{4k_{cy}(d^2 + a^2)}{M_c r_z^2} \approx \mathbf{w}_1^2 \frac{a^2}{r_z^2} \quad (8)$$

Por otra parte, en la circulación en curvas se producen dos desviaciones independientes, a través de las cuales se puede identificar la inclinación real del vehículo ferroviario. Dichos parámetros vienen dados por  $Y_s$  o desviación transversal vinculada a la inclinación de la vía, y por  $q_s$  o ángulo de inclinación centrífuga:

$$Y_s = \frac{M_c g L}{4k_{cy} e} = \frac{gL}{\mathbf{w}_1^2 e} \quad (9)$$

$$q_s = -\frac{M_c g h_0}{e(4d^2 k_{cz} - M_c g h_0)} \quad (10)$$

$L$  es la insuficiencia de peralte y  $e$  es la distancia de separación existente entre los carriles de la vía. Tales desviaciones se desarrollan a través de un eje de inclinación resultante, el cual está desfasado con respecto al eje normal del carril en un ángulo  $q_s$ , y presenta un desplazamiento lateral  $h_s$  definido por medio de la Ecuación 11.

$$h_s = -\frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{h_0^2 + h^2}{h_0} \quad (11)$$

### 3. MODELADO DE LA ESTABILIDAD TRANSVERSAL DEL VAGON

El estudio de la estabilidad transversal de un vagón se puede clasificar en dos categorías diferenciadas: la resolución del problema geométrico en curvas y el estudio de la mecánica del ferrocarril.

#### 3.1. Geometría en tramos curvos

La Figura 3 esquematiza el paso de un coche ferroviario a través de una curva, mediante un modelo multicuerpo [2]. El razonamiento de la geometría en tramos curvos busca establecer relaciones cinemáticas entre los grados de libertad del vehículo, además de concretar la posición de los puntos de contacto, como lo son los radios de rodadura de ambas ruedas, la separación entre puntos de contacto y el ángulo de contacto entre ambas ruedas.

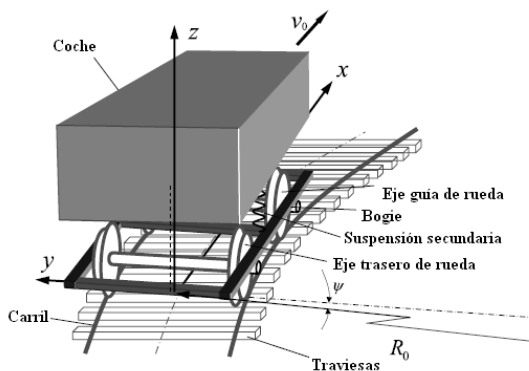


Fig. 3. Circulación de un vehículo ferroviario en curvas

La formulación de Redtenbacher [5] constituye el punto de partida para la modelación analítica de la circulación en tramos curvos. La misma describe la relación geométrica existente entre los dos puntos

de contacto rueda-carril, derivada de una aplicación de la teoría de triángulos semejantes, según se muestra en la Figura 4 y en la Ecuación 12, donde  $r$  es el radio de la rueda,  $l$  el ángulo de conicidad de la rueda y  $R_0$  el radio de curvatura de la vía.

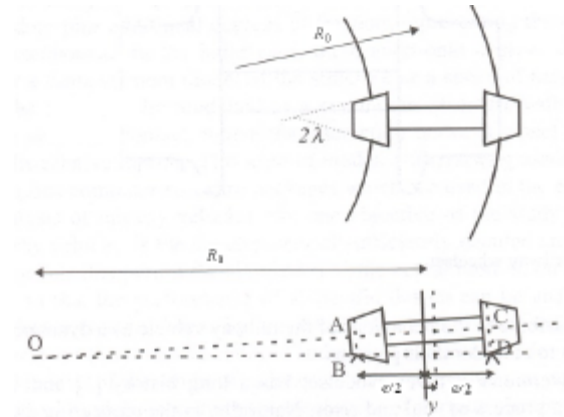


Fig. 4. Detalle de la geometría de circulación en curvas

$$\frac{r - l y}{2R_0 - e} = \frac{r + l y}{2R_0 + e} \quad (12)$$

No obstante, este postulado no profundiza en parámetros importantes y relativos al balanceo y al desplazamiento lateral del coche. En tal sentido, se han diseñado modelos equivalentes que buscan caracterizar tales aspectos, como por ejemplo la modelización por medio de un cuadrilátero articulado [5] detallada en la Figura 5. Mediante la misma es posible hallar relaciones cinemáticas que amplían los desplazamientos derivados de la dinámica vibratoria, empleando para tal fin un mecanismo articulado formado por cuatro barras de distinta longitud unidas en sus extremos.

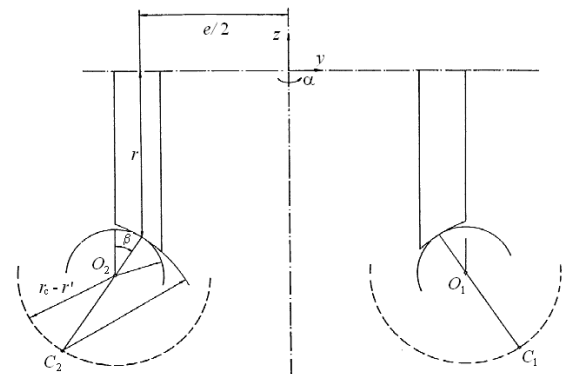


Fig. 5. Modelo del cuadrilátero articulado.

De acuerdo a este método lineal, es posible definir la conicidad equivalente  $g_0$  que caracteriza por completo la geometría de contacto rueda-carril, la rigidez gravitacional lateral  $K_y$  y la rigidez gravitacional de lazo  $K_a$  que permiten precisar las fuerzas y momentos equivalentes de enlace en la zona de contacto, el coeficiente de balanceo  $a$  asociado al ángulo de inclinación del plano de suspensión transversal, y la variación de los ángulos de contacto  $\Delta b_0$ , según se detalla a continuación:

$$g_0 = \frac{r_c b_0}{r_c - r'} \frac{e + 2r' b_0}{e - 2r b_0} \quad (13)$$

$$K_y = W \left( \frac{1}{r_c - r'} \left( \frac{e + 2r' b_0}{e - 2r b_0} \right)^2 - (r + r_c) \left( \frac{b_0}{e - 2r b_0} \right)^2 \right) \quad (14)$$

$$K_a = -\frac{W}{2} (e - r b_0) b_0 \quad (15)$$

$$a = \frac{2 \tan b_0}{e - r \tan b_0} y \approx \frac{2 b_0}{e - r b_0} y \quad (16)$$

$$\Delta b_0 = \frac{1}{r_c - r'} \frac{e + r b_0}{e - r b_0} y \quad (17)$$

$b_0$  representa las condiciones iniciales del ángulo de contacto,  $r_c$  es el radio de curvatura de la cabeza del carril,  $r'$  es la distancia comprendida entre la cabeza del carril y el centro del mismo, y  $W$  es el peso estático aplicado sobre una rueda e igual al peso propio aportado por un vagón. Algunos autores [5, 6] establecen valores límites y recomendaciones específicas para estos parámetros, dependiendo de la velocidad de circulación del tren, y atendiendo a criterios como el rozamiento de las pestañas de las pestañas de las ruedas con el hilo interno de los carriles.

El paso de un vehículo ferroviario por un tramo curvo origina un desplazamiento  $\Delta z$  de su centro de inercia, estando la variación de su altura definida como:

$$\Delta z = x \frac{\Delta y^2}{2} - \frac{e_0 b_0}{2} a^2 \quad (18)$$

$$x = \frac{1}{r_c - r'} \left( \frac{e + 2r' b_0}{e - 2r b_0} \right)^2 \quad (19)$$

Siendo  $\Delta y$  la variación de desplazamiento lateral y  $e_0$  un coeficiente linealizado tabulado [6] y dependiente de la velocidad de desplazamiento  $v_0$ . Existen métodos numéricos no lineales que permiten evaluar de igual forma la geometría de contacto en tramos curvos, basados en el modelado de los perfiles de la rueda y el carril a través de series matemáticas como curvas spline, y en hipótesis referidas al punto de contacto, que precisan iguales curvaturas de rueda y carril en dicho punto, así como también que ambos sólidos no pueden penetrarse entre sí. No obstante, semejantes metodologías solo simplifican y sintetizan, mediante la tecnología computacional, el procedimiento de resolución y análisis establecido por la formulación matemática expuesta.

### 3.2. Mecánica del vagón en tramos curvos

Partiendo de la Ecuación 18 derivada del estudio geométrico, se observa que si se considera el efecto del peso estático  $W$  en la situación del paso de un vagón en un tramo curvo, se puede hallar la expresión asociada al estado mecánico  $U$  de fuerzas:

$$U = -W \Delta z = -W x \frac{\Delta y^2}{2} + W \frac{e_0 b_0}{2} a^2 \quad (20)$$

A partir de la expresión previamente descrita, se obtienen dos términos dinámicos que permiten estudiar la estabilidad del vehículo ferroviario, ellos son el término  $F_{wy}$  vinculado con las fuerzas transversales actuantes sobre el eje de las ruedas, y  $\Gamma_a$  o par de rotación debido a la desigualdad de las fuerzas tangenciales laterales; ambos se definen como:

$$F_{wy} = \frac{\partial U}{\partial y} = -W x \Delta y \quad (21)$$

$$\Gamma_a = \frac{\partial U}{\partial a} = W e_0 b_0 a \quad (22)$$

El término  $F_{wy}$ , proporcional a la carga vertical y al desplazamiento transversal, tiene un efecto estabilizador debido a que adhiere o fija el vehículo con más intensidad en el carril en la medida en que su magnitud aumenta; por el contrario el par debido a la rotación disminuye el efecto estabilizador de la fuerza transversal, debido a que un incremento significativo de su valor se traduce como una inestabilidad capaz de provocar el descarrilamiento del vehículo ferroviario.



Una vez producido el descarrilamiento de un ferrocarril, se presenta un desacoplamiento del mismo con respecto a los carriles. Esta condición de inestabilidad puede ser evaluada con exactitud por medio del criterio de Nadal [5], visto en la Figura 6 y puntualizado por medio de la Ecuación 23, en la cual  $F$  es la fuerza de contacto rueda-carril estimada por medio de la teoría no lineal de Hertz,  $m_c$  es el coeficiente dinámico de roce en el área de contacto,  $t$  es el desplazamiento lateral de la vía calculado mediante la Ecuación 24,  $j$  es el ángulo complementario a  $q_s$ , y  $N$  es la fuerza de roce lateral.

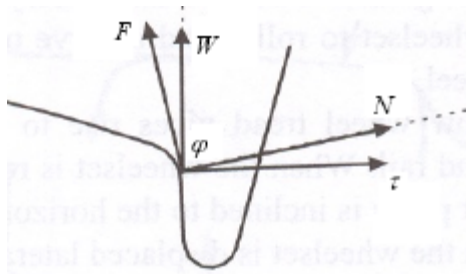


Fig. 6. Estado dinámico de la rueda usado para evaluar el descarrilamiento

$$\frac{t}{W} = \frac{\tan j - m_c}{1 + m_c \tan j} \quad (23)$$

$$t = 10000 + \frac{W}{3} \text{ [N]} \quad (24)$$

De acuerdo con el citado criterio, para que se produzcan condiciones de inestabilidad que puedan desencadenar un descarrilamiento, debe presentarse un desplazamiento lateral de la vía  $t$  mayor a la carga estática  $W$ .

Adicionalmente, cuando el vagón circula en una curva se produce un estado  $Y_T$  de resistencias pasivas al avance que pueden influir en la estabilidad general del ferrocarril. Tal estado puede deberse al rozamiento en los ejes, a la fricción presente en la zona de contacto rueda-carril, al peralte de la curva y a las oscilaciones del coche derivadas de la dinámica vibratoria. Una alternativa utilizada comúnmente en la evaluación de estas resistencias, viene dada por la formulación experimental de Davis [5], que permite incluir los efectos de la resistencia del aire a través de un coeficiente de fricción  $m_A$ .

$$Y_T = 0,27 + 18W + 0,003v_0 + 0,175 \frac{m_A v_0^2}{4W} \quad (25)$$

Bajo este mismo contexto, la expresión empírica de Desdowitz [5] permite estimar las resistencias debidas al rozamiento de las ruedas sobre los carriles, al acomodarse éstas al cambio de curvatura:

$$Y_T = 500 \frac{e}{R_0} \quad (26)$$

Estas resistencias, además de implicar pérdidas energéticas y de potencia durante el movimiento del vehículo ferroviario, afectan sensiblemente la estabilidad del mismo, debido a que originan un estado dinámico irregular e inconsistente, que puede contribuir al aumento de las fuerzas laterales capaces de superar las cargas normales, desequilibrando así el desplazamiento del tren según lo sugerido por el criterio de Nadal.

#### 4. CONCLUSIONES

Si los diversos sistemas elásticos y amortiguadores que caracterizan las suspensiones de un vehículo ferroviario presentan propiedades lineales, es posible estudiar la estabilidad transversal del vagón mediante modelos matemáticos sencillos.

Se puede optimizar la elección de los parámetros constructivos de las suspensiones de un vagón estable, que circula a diferentes velocidades a través de una vía en alineación de buena calidad.

Durante la circulación en curvas, las frecuencias propias verticales presentan una influencia similar a la ejercida por los modos transversales, por tal motivo resulta necesario elaborar un análisis tridimensional en el momento de estudiar la dinámica vibratoria del coche.

La presencia de dos desviaciones de índole estática y dinámica, demuestra que la inclinación real de un vehículo ferroviario no se realiza alrededor de su eje de inclinación interna.

La asimetría de las fuerzas tangenciales laterales produce un momento con respecto al centro del área elíptica de contacto rueda-carril, que perjudica la estabilidad transversal del coche.

**REFERENCIAS**

- [1] Iwnicki, S. *Simulation of wheel-rail contact forces*. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 26(10), 2003, pp. 887 – 900.
- [2] Jin, X., Wen, Z., Xiao, X., Zhou, Z. *A numerical method for prediction of curved rail wear*. Multibody System Dynamics. 18(4), 2007, pp. 531 – 557.
- [3] Szolc, T. *Simulation of dynamic interaction between the railway bogie and the track in the medium frequency range*. Multibody System Dynamics. 6(2), 2001, pp. 99 – 122.
- [4] Szolc, T. *Medium frequency dynamic investigation of the railway wheelset-track system using a discrete-continuous model*. Archive of Applied Mechanics. 68(1), 1998, pp. 30 – 45.
- [5] Iwnicki, S.D. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Taylor and Francis Group, 2006.
- [6] López Pita, A. *Infraestructuras ferroviarias*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.

## CENTRIFUGAL COMPRESSOR INSTRUMENTATION ENGINEERING

### INGENIERIA DE INSTRUMENTACION DEL COMPRESOR CENTRIFUGO

**MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ing. Durwin Alexis Rozo Ibáñez**  
**PhD. Aldo Pardo García**

**Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 156

E-mail: {jdiazcu, durwin.rozo, apardo13}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** This paper deals with the calculation procedure and selection of control and supervision devices and instruments for the installation of an industrial centrifugal compressor. Additionally, it was develop the model and the simulation of the resulting industrial process comprising the centrifugal compressor and a recirculation valve, necessary for the regulator calculation. Finally the total system reliability calculation was performed.

**Resumen:** En este artículo se muestra el procedimiento de cálculo y selección de los dispositivos e instrumentos de control y supervisión para la instalación de un compresor centrífugo industrial. Adicionalmente, se desarrolla el modelado y la simulación del proceso industrial resultante constituido por el compresor centrífugo y una válvula de recirculación, necesario para el cálculo del regulador. Por último se realiza el cálculo de confiabilidad del sistema resultante.

**Keywords :** Centrifugal compressors, control valves, dynamic analysis , PID Control.

## 1. INTRODUCCION

El compresor centrífugo es una máquina en la que el gas es comprimido por la acción dinámica de las paletas giratorias de uno o más rodetes. El rodetete logra esta transmisión de energía variando el momento y la presión del gas. El momento (energía cinética) se convierte en energía de presión útil al perder velocidad el gas en el difusor del compresor u otro rodetete. (Maviansa, 2005).

El aire comprimido se utiliza para la operación de máquinas y herramientas, taladrar, pintar, soplar hollín, en transportadores neumáticos, en la preparación de alimentos, en la operación de instrumentos y para operaciones en el sitio de uso. (Usteola, 2005).

Los compresores centrífugos son el tipo que más se emplea en la industria de procesos químicos porque su construcción sencilla, libre de mantenimiento permite un funcionamiento continuo durante largos períodos. (Usteola, 2005).

El compresor centrífugo más sencillo es el suspendido, de una sola etapa. El impulsor convencional, cerrado o con placas se utilizaría para cargas adiabáticas hasta de unas 12000 (ft-lb)/lb. El impulsor abierto, de álabes radiales producirá mas carga con los mismos diámetros y velocidad, sus variantes, con inductor o alabes tridimensionales producirá hasta 20000 (ft-lb)/lb de carga. (Usteola, 2005).

## 2. NARRATIVA DE PROCESO

### 2.1 Definición del proceso

Procedimiento mediante el cual se disminuye el volumen de una determinada cantidad de aire y aumenta su presión por procedimientos mecánicos para el sistema de aire industrial.

### 2.2 Explicación del proceso

El aire comprimido posee una gran energía potencial, ya que si eliminamos la presión exterior, se expandiría rápidamente. El control de esta fuerza expansiva proporciona la fuerza motriz de muchas máquinas y herramientas, como válvulas, martillos neumáticos, taladradoras, limpiadoras de chorro de arena y pistolas de pintura. Otra aplicación es en la industria del petróleo, gas y sus derivados, una instalación típica de este tipo se muestra a continuación según [ISA, 1992]:

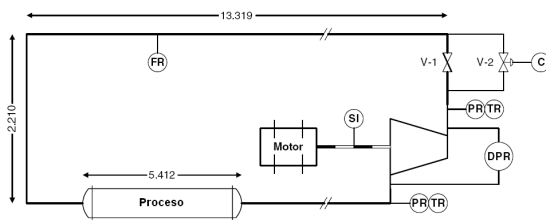


Fig. 1: Diagrama P&ID del sistema

En este ejemplo el compresor utiliza un motor eléctrico de 1.7 MW que se conecta al eje a través de una caja de engranajes. La velocidad rotatoria del compresor puede variarse entre 6 000 y 16 000 rpm. El compresor opera en un circuito cerrado que lo hace posible para usar gases puros diferentes o mezclas de gas. Además, esta configuración permite variar la media presión en el sistema entre 1 y 15 bar. El gas de Nitrogeno  $N_2$  ( $28.0134 \cdot 10^3$  kg/mol,  $R = 296.8$  J/kg · K), un promedio la presión de la succión de 10 bar y a las velocidades rotatorias entre 9 000 y 16 000 rpm.

## 3. NARRATIVA DE CONTROL

### 3.1 Objeto

Describir la funcionalidad del sistema de control para el compresor centrífugo

### 3.2 Filosofía de control

Controlador en modo “regulador”, para mantener a la variable controlada en un punto de control

constante, en presencia de las entradas de perturbaciones, con el fin de conseguir parámetros de ajuste óptimos para cada caso.

### 3.3 Esquemas de Control

El diagrama en bloque del sistema de control se muestra a continuación según [ISA, 1992]:

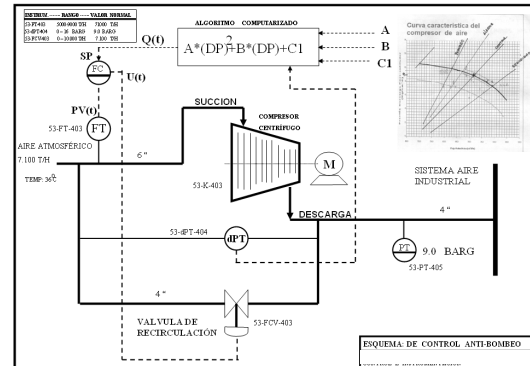


Fig. 2: Diagrama en bloques del sistema de control

### 3.4 Lista de instrumentos y equipos

El listado de los instrumentos y equipos del Sistema de Control, según la figura 2, son:

- 53-FT-403 (Transmisor de flujo).
- 53-K-403 (Compresor centrífugo).
- 53-FCV-403 (Válvula de control).
- 53-dPT-404 (Transmisor de presión dif.).
- 53-PT-405 (Transmisor de presión).

### 3.5 Descripción funcional

La descripción funcional de cada instrumento y equipo se reseña a continuación:

- 53-FT-403  
P&ID: Esquema de Control Anti-Bombeo  
Propósito: Detectar flujo de entrada.
- 53-K-403  
P&ID: Esquema de Control Anti-Bombeo  
Propósito: Comprimir aire
- 53-FCV-403  
P&ID: Esquema de Control Anti-Bombeo  
Propósito: Control de flujo.
- 53-dPT-404  
P&ID: Esquema de Control Anti-Bombeo  
Propósito: Detectar presión diferencial.
- 53-PT-405  
P&ID: Esquema de Control Anti-Bombeo  
Propósito: Detectar de presión.

#### 4. INGENIERIA DE DETALLES

##### 4.1 Dimensionamiento de los instrumentos de control

###### 4.1.1 Válvula

Teniendo en cuenta el *P&ID* del sistema de control del compresor centrífugo, se procede a realizar el cálculo de la válvula de control, que en este caso será de la marca Masoneilan debido a su amplia trayectoria en este campo. Basados en [Masoneilan, 1992] y formulas de dimensionamiento según [Masoneilan, 2000], observamos si el flujo es crítico o subcrítico, para nuestro caso que es un flujo crítico se cumple la ecuación (1).

$$\Delta P \geq 0,5 \cdot C_f^2 \cdot P_1 \quad (1)$$

Donde:

$\Delta P$  = caída de presión a través de la válvula  
 $= P_1 - P_2 = 9.787 \text{ Kg / cm}^2$

$P_1$  = Presión aguas arriba de la válvula

$P_2$  = Presión aguas abajo de la válvula

$C_f$  = Factor de flujo crítico

Basados en el nomograma consultado en [Masoneilan, 1992], se selecciona la válvula SD CH2500 3/92 Series 10000 y obtenemos el  $C_f$ , que para una puesta de trabajo de 50% tiene un factor crítico de 0.9, en cuanto a las particularidades de la válvula se tuvo en cuenta:

Selección de la curva de la válvula de control:

- La variable a controlar (presión).
- El tipo de aplicación (vapor, gas en general).
- Velocidad de proceso (rápida).
- Cuando la dinámica del sistema no se conoce muy bien.
- Cuando se requiere alta rangeabilidad.

Por lo que se decidió que la curva característica fuera Iso-porcentual.

Selección del diseño de la válvula:

- Estrangulación o regulación de circulación.
- Accionamiento frecuente.
- Cierta resistencia aceptable a la circulación.
- El tipo de aplicación (vapor, gas en general).

Por lo que se decidió que el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador fuera de válvula de globo, entre las ventajas obtenemos:

- Estrangulación eficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento.

- Carrera corta del disco y pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y el bonete.
- Control preciso de la circulación.
- Disponible con orificios múltiples.
- Gran caída de presión.

Desventajas:

- Costo relativamente alto en relación al  $C_v$ .

Reemplazando en la ecuación (1), los valores anteriores, tenemos:

$$9.787 \geq 0.5 \cdot (0.9)^2 \cdot 10.8$$

Podemos observar que el flujo es crítico, entonces vamos a [Masoneilan, 1992] y determinamos el coeficiente de flujo de la válvula con la ecuación (3).

$$C_v = \frac{Q\sqrt{GTZ}}{257 \cdot F_L \cdot P_1(y - 0.148y^3)} \quad (3)$$

Donde:

$Q$  = Caudal que circula a través de la válvula.

$G$  = Gravedad específica del gas.

$T$  = Temperatura del gas.

$Z$  = Factor de compresibilidad.

Reemplazando en la ecuación (3), los valores anteriores, tenemos:

$$C_v = \frac{7100\sqrt{1 \cdot 36 \cdot 0.9}}{257 \cdot 0.9 \cdot 10.8 \cdot (1)} = 16.17825$$

Seleccionamos la válvula según [Masoneilan, 1992] las cuales tiene las características siguientes:

$C_v = 16.17825$ .

Diámetro de tubería ( $D$ ) = 4".

Diámetro de orificio = 3.4"-3.5".

Viaje del Actuador = 1.5".

Rotación de la válvula = 20% -30%.

###### 4.1.2 Cálculo de la placa orificio

Basados en los datos anteriores, realizamos los respectivos cálculos para la placa orificio, teniendo en cuenta la ecuación (4) y hallando en coeficiente geométrico de la válvula " $K_v$ "

$$\begin{aligned} K_v &= 0.86 \cdot C_v \\ K_v &= 0.86 \cdot 16.17825 \\ K_v &= 13.913295 \end{aligned} \quad (4)$$

Para hallar el cálculo de la placa orificio nos basamos en la ecuación (5);



$$K_v = p \left( \frac{d}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{2}{1 - \frac{d^4}{D^4}}} \quad (5)$$

Despejando el *diámetro de la placa orificio “d”* de la ecuación (5) y reemplazando obtenemos:

$$d = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot K_v \cdot D^4}{D^4 \cdot p^2 + 8 \cdot K_v^2}} = 0.07 \quad (6)$$

Calculamos **b**, para comprobar si el rango se encuentra entre 0,2 - 0,7:

$$b = \frac{d}{D} = \frac{0,07}{0,1016} = 0.68 \quad (7)$$

Vemos que **b** se encuentra en el rango, por tanto podemos decir que el diámetro calculado es óptimo

### 5.1.3 Selección de instrumentos y equipos

Este aparte se realizó según [Masoneilan, 2009].

### 5.1.4 Típicos de instalación de instrumentos

Transmisor de presión estándar y diferencial para medición de gas.

- Situar las llaves de paso en la parte superior o lateral de la línea, como se observa en la siguiente figura.
- Montar el transmisor al lado o debajo de las llaves de paso de forma que los líquidos puedan drenarse en la línea de proceso.

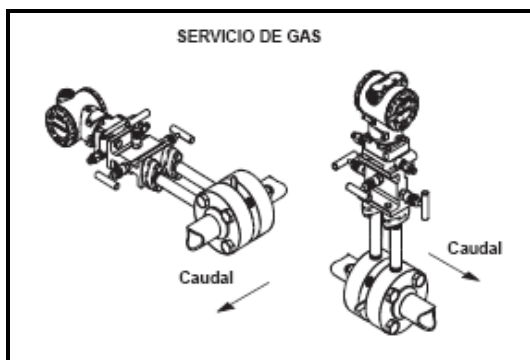


Fig. 3: Ubicación del transmisor de presión

- Para realizar las conexiones eléctricas, extraer la tapa de la carcasa del lateral marcado *Terminales de Campo*.
- No extraer la tapa del instrumento en atmósferas explosivas cuando el circuito esté activo.

- Toda la alimentación al transmisor se suministra mediante un circuito de señalización. Conectar el cable que se origina en el lado positivo de la fuente de alimentación al terminal marcado “+” y el cable que se origina en el lado negativo de la fuente de alimentación con el terminal marcado “-”.

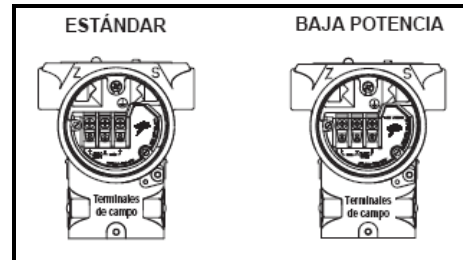


Fig. 4: Instalación del transmisor

- No conectar el cableado de señal alimentado a los terminales de prueba. La alimentación podría dañar el diodo de comprobación en la conexión de comprobación.
- Enchufar y sellar las conexiones del conducto en el alojamiento del transmisor para evitar la acumulación de humedad en el lateral del terminal del alojamiento. Si no se sellan las conexiones no usadas, montar el transmisor con el alojamiento eléctrico situado hacia abajo para el drenaje.
- Instalar el cableado con un circuito de goteo. Ajustar el circuito de goteo de forma que la parte inferior esté por debajo de las conexiones del conducto y del alojamiento del transmisor.
- El puente de la alarma del modo de fallo está situado en la parte delantera de la tarjeta electrónica y en el interior de la cubierta del alojamiento del panel. La posición de este puente determina si la señal de salida se dirige con alta o baja potencia cuando se detecta un fallo (ver próxima figura). Si el puente de la alarma no está instalado, el transmisor funcionará de forma normal y la condición de preajuste de la alarma será alta.

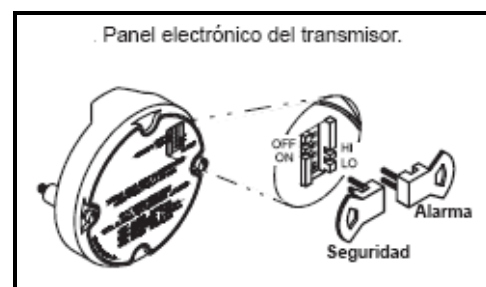


Fig. 5: Instalación del puente de alarma

#### 4.1.5 Red de Campo de Control

La red de campo de control a utilizar es la de tipo electrónica de 4-20 mA, Bus de Campo (FieldBus), usando la una topología anillo (*ring*) como se muestra en la próxima figura.

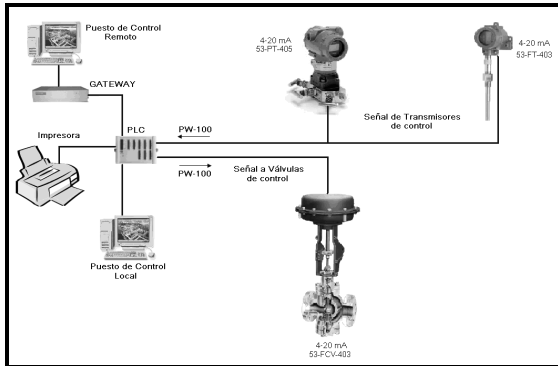


Fig. 6: Topología de la red de campo

La señal de corriente es la misma en cualquier punto de la línea. Puede diferenciarse una avería o ruptura de línea del rango inferior de medida. Además, puede conectarse un número máximo de cargas o instrumentos.

#### 5.1.6 Control supervisorio del proceso

El sistema de automatización HMI (*Interfaz Hombre Máquina*) que se presenta en la figura 7 fue diseñada como una herramienta de interacción con el usuario, el *Intouch*®, basado en una plataforma específica para el monitoreo de entradas analógicas o digitales, visualización gráfica, adquisición y registro de datos, direccionamiento y cambio de parámetros de la red de operación en las secciones individuales de un control antibombeo.

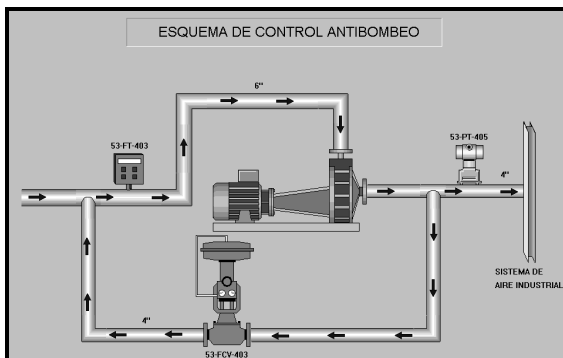


Fig. 7: Esquema del control supervisorio

## 4.2 Cálculo del sistema de control

### 4.2.1 Curva característica del compresor

Las características de funcionamiento de un compresor centrífugo pueden expresarse, como en el caso de las bombas centrífugas, mediante curvas características que muestran la variación de la carga desarrollada frente al caudal volumétrico, para cada velocidad de giro. (Maviansa, 2005).

Los fabricantes de compresores suministran estas curvas para definir el rendimiento entre las bridas de los mismos. Los componentes externos tales como tubos de entrada y descarga, filtros de admisión y válvulas de entrada y descarga, no se suelen tomar en consideración al establecer la curva de rendimiento. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta la caída de presión producida por esos componentes, al emplear la curva de rendimiento.

Se tiene el siguiente conjunto de datos el cual se obtuvo de Cherkasky, 1977:

x=5000	5100	5200	5300	5400	5500
5600	5700	5800	5900	6000	6100
6200	6300	6400	6500	6600	6700
6800	6900	7000	7100	7200	7300
7400	7500	7600	7700	7800	7900
8000	8100	8200	8300	8400	8500

y=10.55	10.53	10.51	10.46	10.43	10.4
10.36	10.32	10.25	10.2	10.15	10.1
10.01	9.895	9.8	9.72	9.6	9.5
9.4	9.28	9.14	9	8.82	8.6
8.35	8.1	7.9	7.7	7.48	7.2
6.88	6.52	6.23	5.97	5.73	5.4

El único punto de trabajo en el que el compresor puede actuar de forma que suministra la presión necesaria es el punto de intersección con la curva característica del sistema. (Maviansa, 2005).

Con estos datos y la herramienta *cftool* para ajuste de curvas del Matlab, se ajusta el conjunto de pares ordenados a una curva cuadrática, obteniendo la figura 8.

Con el ajuste se obtienen el siguiente polinomio de segundo orden:

$$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3.$$

Donde los coeficientes son:

$$p1 = -4.963e-07, \quad p2 = 0.00528, \quad p3 = -3.587.$$

Con los siguientes indicadores del ajuste de la segunda gráfica de la figura 8 se puede observar que el ajuste es excelente con tan sólo un error medio cuadrático de aproximadamente 0.74 %.

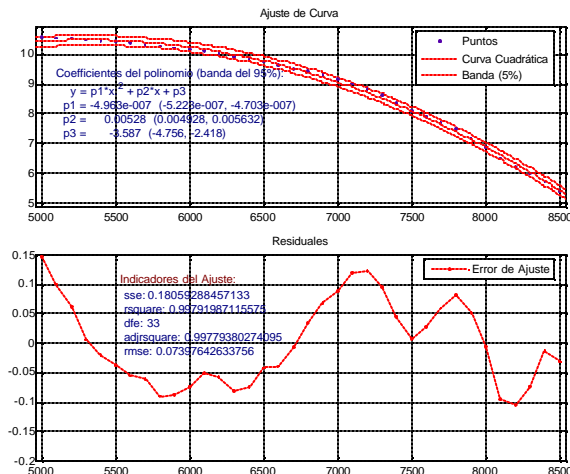


Fig. 8: Ajuste de curva característica

#### 4.2.2 Linealización de la curva característica

Una vez obtenida la curva característica se procede a linealizarla en las cercanías de su punto de operación ( $P = 9 \text{ Kg.cm}^2$ ) y dentro del rango posible de operación. Esta linealización se puede observar en la siguiente figura.

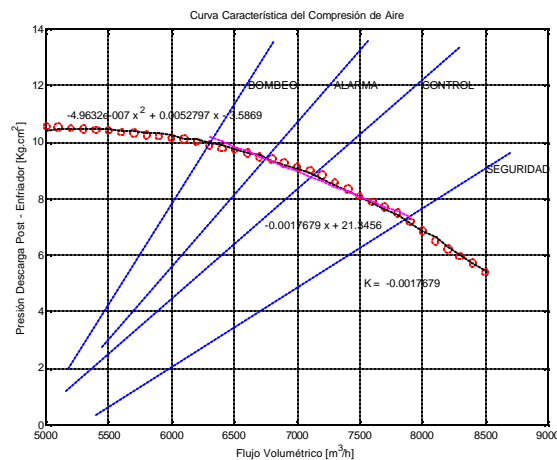


Fig. 9: Linealización de la curva característica del compresor para el rango de operación

Donde se procede a calcular la constante K, que coincide con la pendiente de la recta y cuyo valor es de -0.0017679, es cual es  $K \approx -0.0018$ .

#### 4.2.3 Cálculo del regulador

Según van Helvoirt, 2005 y para los datos de la fig. 1, teniendo en cuenta la dinámica de la válvula y las no linealidades el modelo resultante queda:

$$Gp(s) = e^{-\left(\frac{53}{1280}\right)} \frac{155208.9566}{(s + 30.79)(s^2 + 60.32s + 5042)}$$

Para obtener un modelo lineal y con un retardo de transporte pequeño lo podemos despreciar, su valor es tan sólo de 0.041 seg., obteniendo de esta forma el sistema lineal invariante en el tiempo siguiente:

$$Gp(s) = \frac{155208.9566}{(s + 30.79)(s^2 + 60.32s + 5042)}$$

$$Gp(s) = \frac{155208.9566}{s^3 + 91.11s^2 + 6899s + 155208.9566}$$

De la función de transferencia del sistema se puede observar que en estado estable la ganancia es  $K = 1$ . Además, el margen de ganancia del sistema anterior es de  $G_m \approx 3.05$  a la frecuencia de cruce de ganancia es de  $w_{cg} \approx 83.1 \text{ rad/seg}$ . Estos resultados se obtuvieron del diagrama de Bode del sistema con el uso del Matlab® (próxima figura).

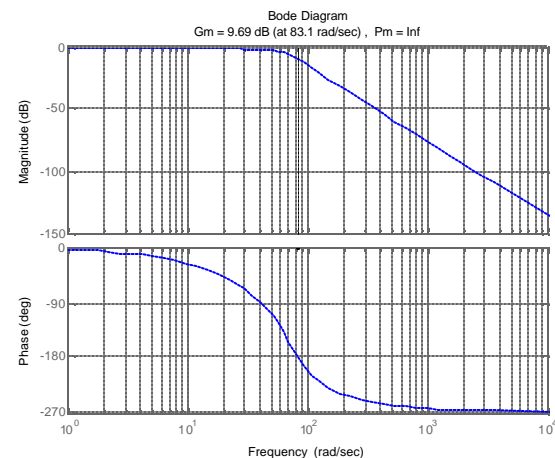


Fig. 10: Diagrama de Bode del sistema

Con los datos anteriores sintonizamos el regulador por el 2º método de Ziegler-Nichols, también conocido como el método de la oscilación cíclica. Este consiste en determinar la ganancia crítica que hace oscilar libremente el sistema  $K_{c_{cr}}$ , y su período de oscilación libre del sistema  $P_{cr}$ .

$$K_{c_{cr}} = G_m \cdot K \approx 3.05 \cdot 1 \approx 3.05$$

$$P_{cr} = 2p / W_{cg} \approx 6.2832 / 83.1 \approx 0.0756 \text{ seg}$$

Tabla 1: Ajuste según Ziegler y Nichols

Regulador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_{c_{cr}}$	¥	0
PD	$0.6 K_{c_{cr}}$	¥	$P_{cr}/8$
PI	$0.45 K_{c_{cr}}$	$P_{cr}/1.2$	0
PID	$0.6 K_{c_{cr}}$	$P_{cr}/2$	$P_{cr}/8$

Según la tabla anterior y escogiendo un regulador tipo PID, podemos obtener los parámetros:

$$K_c = 0.6 \cdot K_{cr} = 0.6 \cdot 3.05 \approx 1.83.$$

$$T_i = P_{cr}/2 = 0.0756/2 \approx 0.0378 \text{ seg}.$$

$$T_d = P_{cr}/8 = 0.0756/8 \approx 0.00945 \text{ seg}.$$

Sustituyendo los parámetros anteriores en la función de transferencia del regulador PID:

$$D(s) = K_c (1 + 1/T_i s + T_d s),$$

$$D(s) = 1.83(1 + 1/0.0378s + 0.00945s).$$

Simulando el sistema y el regulador, previamente calculado, en lazo cerrado ante una entrada escalón unitario en la referencia y en la carga se obtiene la gráfica que se muestra a continuación:

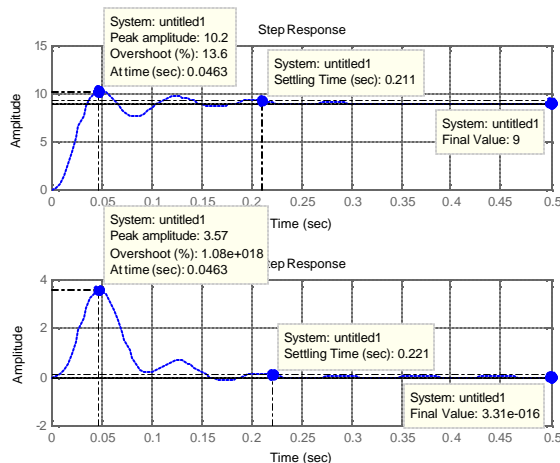


Fig. 11: Respuesta del sistema compensado  
Variación: (a) referencia, (b) carga.

## 5. CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD

### 5.1 Confiabilidad de la válvula de control

Según las tablas internacionales *Failure Rate Data In Perspective (FARADIP)* [Smith, 1988] se obtiene la tasa de fallas de la válvula  $\lambda = 0.2 \text{ FPMH}$ . Convirtiendo el dato anterior en *Fallas / Año (F/A)* se obtiene que [Aranguren, 2004]:

$$I = 1.75315568 \cdot 10^{-3} \text{ F/A}.$$

Ahora bien, el *Tiempo Promedio Para Fallar* (TPPF) de la válvula se obtiene a continuación:

$$TPPF = \frac{1}{I} = \frac{1}{1.75315568 \cdot 10^{-3} \text{ F/A}} = 570.4 \text{ años}. \quad (8)$$

En su defecto, aproximadamente el  $TPPF = 570 \text{ años}$  y  $5 \text{ meses}$ . Como la confiabilidad está dada por:  $R = e^{-It}$ , se tiene la confiabilidad de la válvula:

$$R_1 = e^{-(1.75315568 \cdot 10^{-3} \text{ F/A})(1 \text{ año})} \approx 0.9982.$$

### 5.2 Confiabilidad del Transmisor de Presión

Según las tablas internacionales *FARADIP* se obtiene:  $\lambda = 1 \text{ FPMH}$ . Convirtiendo el dato anterior en *Fallas / Año (F/A)* se obtiene que:

$$\lambda = 8.765778401 \cdot 10^{-3} \text{ F/A}.$$

Ahora bien, el *TPPF* del Transmisor de Presión se obtiene a continuación y se observa que:

$$TPPF = \frac{1}{I} = \frac{1}{8.765778401 \cdot 10^{-3} \text{ F/A}} = 114.08 \text{ años}. \quad (9)$$

En su defecto, aproximadamente el  $TPPF = 114 \text{ años}$  y  $29 \text{ días}$ . Como la confiabilidad está dada por:  $R = e^{-It}$ , se tiene que la confiabilidad del transmisor de presión de gas combustible es:

$$R_2 = e^{-(8.765778401 \cdot 10^{-3} \text{ F/A})(1 \text{ año})} \approx 0.9913.$$

### 5.3 Confiabilidad total

Ahora bien, para obtener la confiabilidad total ( $R_{T1}$ ), del Lazo de control, se obtiene a través de la multiplicatoria de las confiabilidades, obtenidas para cada subsistema, por separado; de acuerdo a lo anterior se obtiene lo siguiente:

$$R_{T2} = \prod_1 \{R\} = \{(R_1)(R_2)(R_3)\}.$$

$$R_{T2} = \{(0.9913)(0.9913)(0.9182)\} \approx 0.9023.$$

De forma inversa podemos conseguir el *Tiempo Promedio Para Fallar* del sistema resultante que sería de 58.6418 años o 58 años, 7 meses y 21 días.

## 6. CONCLUSIONES

Se definió el proceso objeto de estudio, el compresor centrífugo, para el cual se estableció un esquema de control. A partir de este esquema y teniendo disponible los catálogos se calcularon y seleccionaron los dispositivos, entre ellos la válvula de regulación de flujo y los instrumentos, tales como los transmisores de flujo y presión. Como medidor de flujo se calculó la placa orificio, la cual tiene la ventaja en comparación con los otros elementos primarios de medición de su costo el cual llega a ser comparativamente bajo, además es fácil de instalar y desmontar; y que se consigue un alto grado de exactitud.

Se estableció la red de campo de control a utilizar que fue de tipo electrónica de 4-20 mA usando la una topología anillo en la cual el intercambio se lleva a cabo por medio de un mecanismo estándar (Bus de Campo), permite la flexibilidad de extensión, la conexión de diferentes instrumentos en una misma línea, posibilidad de conexión de

dispositivos de diferentes procedencias, distancias operativas superiores al cableado tradicional, reducción masiva de cables y costo asociado con la simplificación de la puesta en servicio.

Se aproximó los datos de la curva característica del compresor centrífugo a un polinomio de 2<sup>do</sup> orden con error inferior a 0.74% utilizando el Matlab®.

Se obtuvo la función de transferencia del sistema de control, la cual se aproximó a un sistema lineal y para la cual se calculó un regulador tipo PID el cual se sintonizó según el 2<sup>do</sup> Método de Ziegler - Nichols. Se simuló el sistema resultante ante entradas tipo escalón en la referencia y el disturbio.

Por último se conduce un análisis de confiabilidad en el cual el sistema resultante consigue un Tiempo Promedio Para Fallar bastante bueno para este tipo de aplicación.

## REFERENCIAS

- Aranguren, S. y Tarantino. R. 2004. "Sistemas para la detección y diagnóstico de fallas: implantación industrial". Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, No. 3. Universidad de Pamplona. Colombia.
- Cherkasky, V. 1977. *Pumps, fan and compressors*. MIR Publishers, Moscu.
- Creus S., A. 1998. *Instrumentación Industrial*. 6<sup>ta</sup> Edición. Editorial Alfa-Omega.
- Greitzer, E. M. 1976. "Surge and rotating stall in axial flow compressors: Part I— Theoretical compression system model," ASME J. Eng. Power, vol. 98, pp. 190–198.
- ISA, 1986. *Graphic Symbols for Process Displays*. SA-5.5–1985, February.
- ISA, 1991. *Instrument Loop Diagrams*. ANSI/ISA-5.4–1991, September.
- ISA, 1992. *Instrumentation Symbols and Identification*. ANSI/ISA-5.1–1984 (R1992), July.
- ISA, 1995. *Process Instrumentation Terminology*. ANSI/ISA-51.1–1979 (R1993), May.
- Maldonado, L. C.; Tarantino A., R.; Aranguren, S. y Peñaloza Solano, S. 2009. "Ingeniería de automatización para el proceso de humectación de la arcilla en las industrias del norte de Santander – Colombia". Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, No. 13. Universidad de Pamplona.
- Masoneilan, 1992. *10000 Series Control Valves. A Complete Line of Rugged Top and Bottom Guided Double Ported Globe Valves*. Masoneilan North American Operations.
- Masoneilan, 2000. *Handbook OZ1000 7/00*. Masoneilan Valve Division, pp. 30.
- Masoneilan, 2009. *Catalogo en Línea*, consultado: <http://www.masoneilan.com/index.cfm/go/list-prodsubline/productline/instrumentation/>
- Maviansa, 2005. *Compresores (versión Online)*.
- Ogata K. 2003. *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, S.A. Madrid.
- Pardo, A; Díaz, J. L. 2004. *Fundamentos en Sistemas de Control Automático*. Universidad de Pamplona.
- Redmill, F. and Anderson, T. 2008. *Improvements in System Safety*. Sixteenth Safety-critical Systems Symposium Springer London, UK, pp. 225-238.
- Rueda, Jaime. 2002. *Redes LAN-MAN*. Editorial SIC. Colombia.
- Smith D. J. 1988. *Failure rate data in perspective (FARADIP)*. (This is a computer version of failure rates given in Smith).
- Smith D. J. 2005. *Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers*. 7<sup>th</sup> Ed, Elsevier Butterworth – Heinemann, London, UK.
- Smith D. J., Kenneth G. L. Simpson. 2001 *Functional safety: a straightforward guide to IEC 61508 and related standards*. Butterworth – Heinemann, London, UK.
- Smith, C. y Corripio, A. 2007. *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa.
- Tarantino. R. y Aranguren, S. 2005. *Básico de Instrumentación Industrial*. Universidad de Pamplona. Colombia.
- Ustiola B., Juan C., 2005. *Compresores (versión online)*. *Industriales. Máquinas de flujo. Tipos. Mantenimiento*. Wood Group Gas Turbines. Venezuela.
- van Helvoirt, J.; Jager, B.; Steinbuch M. and Smeulers, J. 2005. "Modeling and Identification of Centrifugal Compressor Dynamics with Approximate Realizations". Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications Toronto, Canada, August 28-31.
- Willems, F. P. T. 2000. *Modeling and bounded feedback stabilization of centrifugal compressor surge*. Ph.D. Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands.
- Ziegler, J. G. and Nichols, N. B 1942. "Optimum settings for automatic controllers". Trans. ASME, 64, 759-768.



## FUZZY SYSTEM TO EVALUATE WORK FOR GRADUATION

### SISTEMA DIFUSO PARA LA EVALUACION DE TRABAJOS DE GRADO

MSc. Luz Marina Santos Jaimes, Ing. Edgar Andrei Pérez

#### Grupo de Investigación Ciencias Computacionales

Programa Ingeniería de Sistemas, Universidad de Pamplona, Km.1 Vía Bucaramanga  
E-mail: {lsantos, ingpaul}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** In order to withstand the process of job evaluation grade in the Department of Electrical Engineering, Electronics, Telecommunications and Systems at the University of Pamplona, Colombia, developed a computational system based on fuzzy logic. In this system, the final score of a draft grade is the result of three linguistic input variables: incomplete, approved and excellent. This system uses fuzzy methods showed support and standardize the process of subjective evaluation, being fast, robust and fair, confirming the application of fuzzy theory in the assessment area.

**Resumen:** Con el objetivo de soportar el proceso de evaluación de trabajos de grado en el Departamento de Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Telecomunicaciones y Sistemas de la Universidad de Pamplona, Colombia, se desarrolla un sistema computacional basado en lógica difusa. En este sistema, la calificación final de un proyecto de grado es resultado de tres variables de entrada lingüísticas: incompleto, aprobado y excelente. Este sistema derivado de los métodos difusos demostró soportar y estandarizar el proceso de evaluación subjetiva, siendo rápido, robusto y justo; confirmando la aplicación de la teoría difusa en el área de evaluación.

**Keywords:** Fuzzy logic, Evaluation, Fuzzy system, Linguistic variables.

## 1. INTRODUCCION

El proceso de evaluación de trabajos de grado en el Departamento de Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Telecomunicaciones y Sistemas es un proceso delicado que requiere gran atención por parte del evaluador. La evaluación es cualitativa expresada en un término lingüístico y resultado del análisis de parámetros no estandarizados y escasos; en su mayoría, basada en el área de desempeño y posiciones particulares de los evaluadores. Así, el veredicto dado por un evaluador podría en determinado caso ser más subjetivo que exacto, respecto de lo que se piensa sobre uno u otro aspecto de un trabajo de grado.

En las unidades académicas de las universidades, no existe un marco unificado de criterios para evaluar proyectos de grado, lo que hace necesario que la evaluación sea en cierta medida orientada y soportada computacionalmente. En este sentido, la lógica difusa, es una herramienta proveniente de la inteligencia computacional, motivada, en gran medida, por la necesidad de crear un marco conceptual para la representación flexible del conocimiento, dentro de un ambiente impreciso e incierto (Yager and Zadeh, 1992), abre la posibilidad de dar solución a problemas comunes de la evaluación, que expresados desde la perspectiva humana y que, por ésta simple

condición, no pueden tener una solución única desde lo “falso” ó “verdadero” sino que pueden tomar condiciones intermedias para dar soluciones satisfactorias a los problemas presentados.

En este contexto, se originó esta investigación, que tiene características de pionera en su campo, se diseñó una herramienta computacional que hace uso de la lógica difusa, por medio de la cual es posible dirimir imprecisiones en la valoración de los trabajos de grado, con lo que se tiene desde ya una solución que bien podría aplicarse a otros procesos de evaluación.

### 1.1 Lógica Difusa

El concepto central de la lógica difusa es el “conjunto difuso”, el cual es considerado una extensión de los conjuntos ordinarios y fue presentado por (Zadeh, 1965). En la teoría de conjuntos difusos, la pertenencia de un elemento determinado a un conjunto dado obedece a una lógica multivaluada dentro del intervalo  $[0,1]$ , que asigna al elemento un “grado de pertenencia” que puede ir desde la no pertenencia (0) hasta la pertenencia total (1).

Dentro de esta idea la calificación de un trabajo de grado puede ser considerada una “variable difusa” que podría clasificarse en tres (o más) conjuntos difusos etiquetados como: incompleto, aprobado o excelente, donde la transición de la pertenencia de un conjunto a otro, de un proyecto de grado con una calificación  $x$ , es gradual.

### 1.2 Trabajos relacionados

Aplicaciones específicas de la lógica difusa en la evaluación de elementos subjetivos son relativamente pocos en comparación con a otras áreas de aplicación.

En (Pépiot *et al*, 2007) es propuesto un acercamiento metodológico para evaluar competencias, el cual fue probado en un problema real en la industria del transporte.

En (Dweiri and Kablan, 2005), es diseñado e implementado un sistema de toma de decisión difuso para evaluar la eficiencia en el manejo de proyectos. Esto sugiere, que puede ser útil para un área integrar el conocimiento del experto y la experiencia en un sistema difuso que puede ser usado para la evaluación.

### 1.3 Evaluación de proyectos de grado

La calificación de un proyecto de grado es dada por una terna de evaluadores asignados por el Departamento, atendiendo las normas establecidas en el reglamento estudiantil y la metodología del Departamento. Un jurado (oponente) califica 10 criterios y da un veredicto final de Incompleto, Aprobado o Excelente, el director del proyecto evalúa otros tres criterios y de igual forma da un veredicto final. Con los dos anteriores resultados, y sus propios juicios la terna de jurados concluye con una calificación de Incompleto, aprobado, excelente, meritorio o laureado.

Con una muestra de 175 actas de calificación de oponentes y director de trabajos de grado en las cuales se analizaron las respuestas dadas a los criterios actuales de evaluación, se encontró que solo un 76,53% de estas actas son diligenciadas de forma correcta (Incompleto, Aprobado o Excelente) y el 23,47% de las actas se utilizan calificativos no dados por la metodología (Alto, no aplica, bueno, entre otros).

En ocasiones los resultados parciales difieren de la valoración final, por ejemplo 7 criterios excelentes y 3 aprobados con una valoración final de aprobado.

Lo anterior demuestra la importancia de estandarizar el proceso con la ayuda de una herramienta computacional que permita cuantificar cada uno de los criterios y llegar a una valoración final cualitativa en forma más precisa y justa.

Según la definición de la calificación cualitativa por parte de nuestra Universidad y con los criterios expuestos en otras Universidades (Gan and Tarantino, 2006; CIDER, 2006; Graell, *et al*, 2005; CA, 2007; Ramírez and Roncancio, 2006), se propone una metodología robusta centralizada en cinco puntos principales que serán la base del sistema difuso, cada punto corresponderá a un subsistema difuso.

Los puntos para el calificativo de “Aprobado” o “Incompleto” del proyecto son: Dimensiones, Informe, Objetivos y Sustentación.

Y el punto para el estudio de la calificación de “Excelente”, “Meritorio” o “Laureado” es: Novedad\_Efecto.

## 2. DESARROLLO DEL SISTEMA DIFUSO

Cuando se diseña un sistema difuso el primer paso es seleccionar la estructura del sistema en estudio. En este caso el sistema trabaja con una estructura del tipo Puro ó Mamdani (Kandel, 1986). La arquitectura general del Sistema Difuso consta principalmente de tres partes, la fusificación, base de conocimiento con su sistema de inferencia y la defusificación (Ver figura 1).

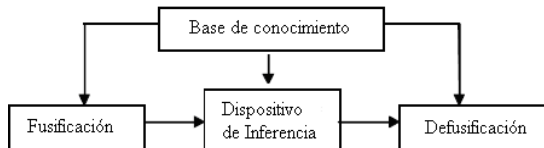


Fig. 1. Arquitectura General del Sistema Difuso

### 2.1 Fusificación

La fusificación toma los valores de entrada y los interpreta como valores lingüísticos. En este paso se determinan las funciones de membresía de las variables del sistema en los conjuntos difusos (Moreno, 2003).

Para el sistema general el universo de discurso de cada una de las variables está determinado por componentes lingüísticos del tipo: “Incompleto”, “Aprobado”, “Excelente” para las entradas; “Incompleto”, “Aprobado”, “Excelente”, “Meritorio” y “Laureado” para la salida. Para cada uno de los subsistemas el universo del discurso de las variables de entrada y salida esta dado por valores lingüísticos de la forma: “Incompleto”, “Aprobado” y “Excelente”.

### 2.2 Base de Conocimiento

La base de conocimiento está compuesta por una serie de reglas difusas del tipo MISO (*Multiple Input Single Output*) y se expresa según los siguientes criterios:

#### 1 Dimensiones

- 1.1 Tamaño
- 1.2 Pertinencia
- 1.3 Actualidad
- 1.4 Profundidad
- 1.5 Novedad,
- 1.6 Individualidad
- 1.7 Originalidad
- 1.8 Independencia
- 1.9 Presupuesto económico
- 1.10 Ética y estética

## 2 Informe

- 2.1 El informe presenta todas las partes establecidas en la metodología del CTG
- 2.2 El informe del trabajo no presenta errores de redacción ortografía o presentación.
- 2.3 El Resumen expresa lo normado en la metodología.
- 2.4 La Introducción expresa lo normado en la metodología.
- 2.5 El Marco Teórico expresa los conceptos necesarios para el desarrollo del trabajo.
- 2.6 Pertinencia de las conclusiones y recomendaciones.
- 2.7 Las observaciones presenta sugerencias para la implantación de la propuesta elaborada y el desarrollo o continuación en otros trabajos.
- 2.8 Utilización de bibliografía técnica actualizada.
- 2.9 La bibliografía esta presentada en correspondencia con las normas establecidas en la metodología de CTG.
- 2.10 La organización del texto evidencie unidad y coherencia.

## 3 Novedad/Efecto

- 3.1 Novedad del tema por su contribución al desarrollo del conocimiento del área en la Región.
- 3.2 Novedad del tema por su contribución al desarrollo del conocimiento del área.
- 3.3 Su efecto social es muy significativo.
- 3.4 Efecto económico es muy significativo.

## 4 Objetivos

- 4.1 Los objetivos, general y específicos, son alcanzados.
- 4.2 El informe del trabajo se desarrollo en concordancia con los objetivos.
- 4.3 Los resultados corresponden con los objetivos propuestos.

## 5 Sustentación

- 5.1 Dominio de habilidades comunicativas en la exposición.
- 5.2 Profesionalidad en la interpretación y respuesta de las preguntas del jurado.
- 5.3 Calidad y adecuada utilización del material de apoyo audiovisual o gráfico presentado.
- 5.4 Estética profesional ante el jurado, en el acto de sustentación.

### 2.3 Formato de las reglas

Una de las características de los sistemas difusos es que pueden ser modelados de forma lingüística usando reglas de decisión de la forma SI-ENTONCES (Zadeh, 1973; Tong, 1978; Pedrycz, 1989). La habilidad en la toma de decisiones depende de la existencia de una base de reglas y un mecanismo de razonamiento difuso.

Un sistema tipo Mamdani entre sus características, proporciona un marco natural para la inclusión de conocimiento experto en forma de reglas lingüísticas (Lin, 1995). La base de reglas se generó con el aval de docentes del Departamento, teniendo en cuenta los criterios mencionados en 2.2 como entrada a cada subsistema y sus posibles valores de “Incompleto, Aprobado o Excelente”.

El formato de las reglas utilizado es el mismo tanto para el sistema general como para cada uno de los subsistemas difusos que sirven de entrada al modelo general. El formato general de las reglas aplicadas en el sistema general se presenta a continuación.

**Si Informe es EXCELENTE y Objetivos es EXCELENTE y Dimensiones es EXCELENTE y Sustentación es EXCELENTE y Novedad\_Efecto es EXCELENTE ENTONCES RESULTADO es EXCELENTE**

Para los subsistemas difusos las reglas son manejadas de la misma forma y tienen la misma estructura, un ejemplo de estas reglas es mostrado a continuación.

**Si Criterio 3.1 es EXCELENTE y Si Criterio 3.2 es EXCELENTE y Si Criterio 3.3 es EXCELENTE y Si Criterio 3.4 ENTONCES NOVEDAD\_EFECTO es EXCELENTE**

### 2.4 Funciones de membresía

Cada una de las entradas de los subsistema difusos tienen características iguales, los cuales fueron diseñados en base a funciones de membresía y determinadas en base a las curvas de función de las variables la cual es la misma para todos los subsistemas. La especificación y la gráfica de la función de membresía se muestran a continuación teniendo como referencia un trapecio con vértices a, b, c y d para sus coordenadas.

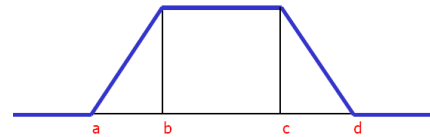


Fig. 2. Trapecio de referencia

#### 2.4.1 Función de membresía Tipo1

La función de membresía asociada a las variables de entrada de los subsistemas y el sistema general tiene como etiquetas lingüísticas a “Incompleto”, “Aprobado” y “Excelente”.

La etiqueta “Incompleto” está determinada por una función trapezoidal que va desde (0, 1) hasta (2, 1) y luego de (3, 0) hasta (5, 0). La etiqueta “Aprobado” es una función trapezoidal que tiene como coordenadas (0, 0), (2, 0), (3, 1), (4, 1) y (5, 0). La etiqueta “Excelente” es una función trapezoidal con coordenadas (0, 0), (4, 0) y (5, 1). (Ver figura 3)

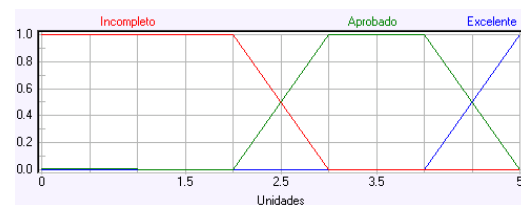


Fig. 3. Función de Membresía de las variables de entrada

#### 2.4.2 Función de membresía Tipo2

La variable de salida del sistema principal adquiere valores entre 0 y 5. A continuación se muestra especificada la variable de salida utilizada. Las etiquetas lingüísticas asociadas a la función de membresía son las siguientes: “Incompleto” con una línea que parte desde (0,1) hasta (2.5,1), luego de (3,0) hasta (5,0), “Aprobado” con una función trapezoidal que tiene como coordenadas (0,0), (2.5,0), (3,1), (3.5,1), (4,0), (5,0), “Excelente” con una función trapezoidal con coordenadas (0,0), (3.5,0), (4,1), (4.5,0), (5,0), “Meritorio” con una función triangular con coordenadas (0,0), (4,0), (4.5,1), (5,0) y “Laureado” con coordenadas (0,0), (4.5,0), (5,1). (Ver figura 3)

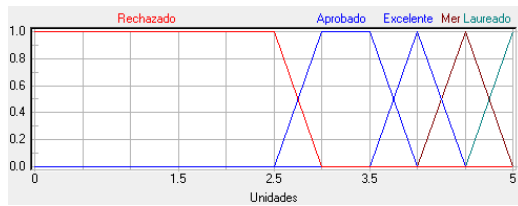


Fig. 4. Función de Membresía de la salida

### 2.5 Arquitectura del sistema principal

La arquitectura del modelo difuso del sistema principal, consta de 5 variables de entrada (Dimensiones, Informe, Novedad\_Efecto Objetivos y Sustentación,), un bloque de reglas y una variable de salida (Resultado). La arquitectura general del sistema principal se muestra en la fig. 4. Las líneas de conexión simbolizan el flujo de datos.

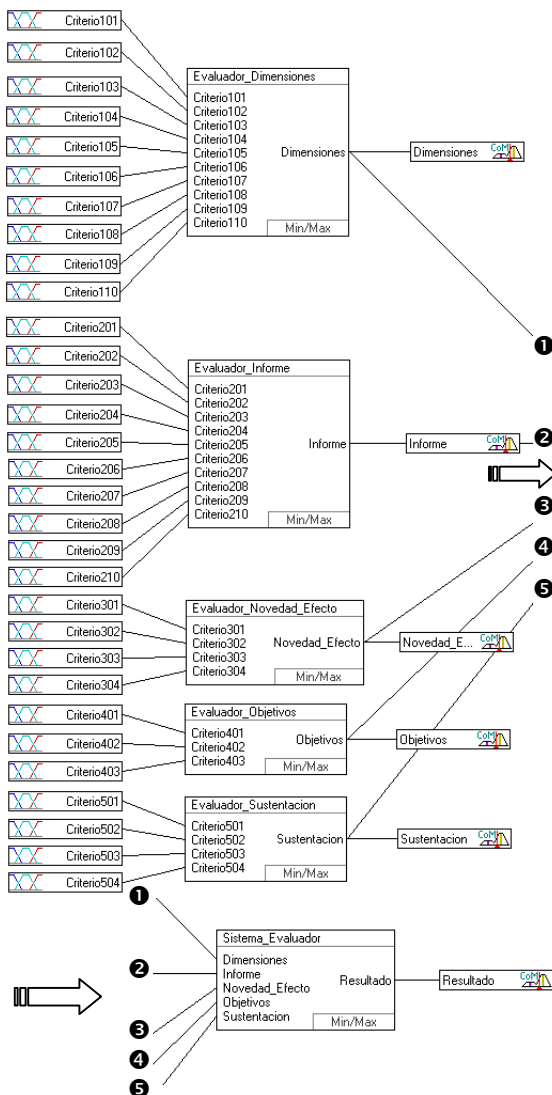


Fig. 5. Arquitectura del modelo del sistema principal

La descripción detallada de las variables, cuyo rango de acción fue mínimo 0 y máximo 5, su tipo, membresía y sus etiquetas lingüísticas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Variables del sistema principal

Variable	Tipo/ Membresía	Términos lingüísticos
Dimensiones	Entrada Tipo1	Incompleto
		Aprobado
		Excelente
Informe	Entrada Tipo1	Incompleto
		Aprobado
		Excelente
Novedad Efecto	Entrada Tipo1	Incompleto
		Aprobado
		Excelente
Objetivos	Entrada Tipo1	Incompleto
		Aprobado
		Excelente
Sustentación	Entrada Tipo1	Incompleto
		Aprobado
		Excelente
Resultado	Salida Tipo2	Incompleto
		Aprobado
		Excelente
		Meritorio Laureado

#### 2.5.1 Arquitectura de los subsistemas

La arquitectura del modelo del subsistema difuso Dimensiones, consta de 10 variables de entrada (Criterio1.1, Criterio1.2, Criterio1.3, Criterio1.4, Criterio1.5, Criterio1.6, Criterio1.7, Criterio1.8, Criterio1.9, Criterio1.10), un bloque de reglas y una variable de salida (Dimensiones).

La arquitectura del modelo del subsistema difuso Informe, consta de 10 variables de entrada (Criterio2.1, Criterio2.2, Criterio2.3, Criterio2.4, Criterio2.5, Criterio2.6, Criterio2.7, Criterio2.8, Criterio2.9, Criterio2.10), un bloque de reglas y una variable de salida (Informe).

La arquitectura del modelo del subsistema difuso Novedad\_Efecto, consta de 4 variables de entrada (Criterio3.1, Criterio3.2, Criterio 3.3 y Criterio 3.4), un bloque de reglas y una variable de salida (Novedad).



La arquitectura del modelo del subsistema difuso Objetivos, consta de 3 variables de entrada (Criterio 4.1, Criterio4.2, Criterio4.3), un bloque de reglas y una variable de salida (Objetivos).

La arquitectura del modelo del subsistema difuso Sustentación, consta de 4 variables de entrada (Criterio4.1, Criterio4.2, Criterio4.3, Criterio4.4), un bloque de reglas y una variable de salida (Sustentación). La arquitectura general del subsistema difuso Sustentación se muestra en la figura 5. Las líneas de conexión simbolizan el flujo de datos.

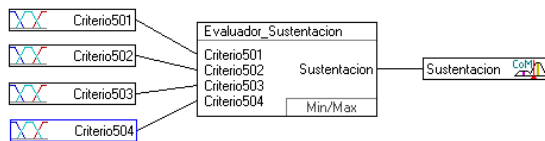


Fig. 5. Modelo del Subsistema Sustentación

Tabla 2. Variables del subsistema Sustentación

Variable	Tipo/ Membresía	Términos lingüísticos
Criterio 501	Entrada Tipo1	Incompleto Aprobado Excelente
Criterio 502	Entrada Tipo1	Incompleto Aprobado Excelente
Criterio 503	Entrada Tipo1	Incompleto Aprobado Excelente
Criterio 504	Entrada Tipo1	Incompleto Aprobado Excelente
Sustentación	Salida Tipo1	Incompleto Aprobado Excelente

### 2.6 Defusificación

La defusificación consiste en la conversión de los datos lingüísticos que provienen de la salida difusa del dispositivo de inferencia a una salida numérica, mediante una ponderación y normalización de las sentencias lógicas antecedentes.

El método de defusificación utilizado tanto para el sistema general como para cada uno de los subsistemas fue el método del centroide.

### 2.7 Simulación del sistema

Se realizó la monitorización para la activación de reglas de cada subsistema y el sistema principal, mediante un conjunto de tres escenarios que permitieron verificar por expertos la predicción del sistema.

En vista que el acta de sustentación actualmente no abarca todos los criterios aquí propuestos y no presenta datos numéricos no fue posible realizar simulación con datos de los trabajos de grado.

## 3. CONCLUSIONES

Se seleccionaron los criterios de evaluación, en consideración a su representatividad de variables y procesos que son los más apropiados para aplicar al caso de la Universidad de Pamplona.

Los resultados obtenidos, sugieren que las técnicas de inteligencia artificial y en este caso de Lógica difusa para la concepción de herramientas aplicadas al apoyo de la evaluación de Trabajos de Grado, son un enfoque adecuado.

Esta investigación logró establecer y desarrollar la arquitectura de un Modelo Inteligente de una efectividad aceptable para apoyar la toma de decisiones en la evaluación de Trabajos de Grado. Además, su sencillo manejo a través de una interfaz amigable, le permite al usuario interactuar con un sistema de soporte computacional complejo sin mayores dificultades.

Buena parte del éxito del Sistema Inteligente para el apoyo de evaluación de Trabajo de Grado, reposa en la flexibilidad de la Lógica Difusa, que permite procesar la información de forma eficiente y generar herramientas que permite realizar simulaciones diferentes que la Lógica Formal o Clásica nos permite.

El desarrollo de este proyecto requirió de un trabajo interdisciplinario que involucró un acercamiento entre las ciencias computacionales y las ciencias básicas. En este aspecto es de resaltar la contribución que las ciencias computacionales pueden tener en la solución de problemas complejos referidos a la evaluación en general.

**REFERENCIAS**

- C.A., Comité Académico, Universidad Jorge Tadeo Lozano. (2007) Metodología Trabajo de Grado CIDER, Universidad de los Andes. (2006) Reglamento Trabajo De Grado.
- Dweiri, F.T and Kablan, M.M. (2005). Ussing fuzzy decision making for the evaluation of the project management internal efficiency, *Decision Support Systems*.
- Gan, A., y Tarantino, R. (2006) Metodología Trabajo de Grado, Universidad de Pamplona.
- Graell, M., Melo, V., y Urieta, I. (2005). Propuesta de reglamento examen general de conocimientos. Universidad Tecnológica de Panamá.
- Lin, C., 1995, A neural fuzzy control system with structure and parameter learning, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.70, pp. 183-212.
- Moreno, F.J. (2003). Un entorno de desarrollo para sistemas de inferencia complejos basados en lógica difusa, Tesis de Doctorado, Universidad de Sevilla.
- Pedrycz.W. (1989) *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, Jhon Wiley.
- Pépiot, G., et al. (2007) A fuzzy approach for the evaluation of competences, *International Journal of Production Economics (Article In Press)*. 2007
- Ramírez, C., y Roncancio, H. (2006) Manual De Procedimientos - 2006, Institución Universitaria de Envigado.
- Tong, R. M. (1978) Sinthesis of fuzzy models for industrial processes-some recent results, *International Journal of General Systems*.
- Kandel, A. (1986). *Fuzzy Mathematical Techniques with Applications*, Addison Wesley.
- Yager, R. and Zadeh, L. (1992). *An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems*. Kluwer Academic Publishers.
- Zadeh, L. (1965). *Fuzzy Sets. Information and Control*.
- Zadeh, L. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Trans. System*.

Recibido: 09 de marzo de 2009  
Aceptado: 26 de mayo de 2009**IMPLEMENTING THE ONTOSMD METHOD IN DESIGN OF A CONCEPTUAL  
MODEL FOR THE CONSTRUCTION OF A KNOWLEDGE BASE OF THE  
SUPPORT SERVICE IN INFORMATION TECHNOLOGY****APLICACION DEL METODO ONTOSMD EN EL DISEÑO DE UN MODELO  
CONCEPTUAL PARA LA CONSTRUCCION DE UNA BASE DE  
CONOCIMIENTO DEL SERVICIO DE SOPORTE EN TECNOLOGIA DE  
INFORMACION****MSc. Mauricio Rojas Contreras, Esp. Maritza del Pilar Sánchez Delgado****Universidad de Pamplona.** Grupo de Investigación CICOM  
Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.  
Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 164.  
E-mail: {mrojas,pilas}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** The paper presents the application of a method for developing ontologies for domain modeling in the context of support services in information technologies. It proposes the design of a knowledge structure that lets store all the experience and information necessary to deliver a line of flexible and effective support to the customer after sales support. The use of this method facilitates the construction of a conceptual model that identifies and defines the core concepts and relationships of the IT Support Service. Among the relevant results of this work is the definition of the scope of the domain, the list of issues, the list of concepts and a conceptual model that relates these concepts.

**Resumen:** El artículo presenta la aplicación de un método para desarrollar ontologías durante el modelado del dominio en el contexto del servicio de soporte en tecnologías de información. Se propone el diseño de una estructura de conocimiento que permita almacenar toda la experiencia e información necesaria para ofrecer una línea de soporte ágil y eficaz al cliente en el soporte post venta. La aplicación del método planteado facilita la construcción de un modelo conceptual que identifica y define los conceptos y relaciones bases del Servicio de Soporte en TI. Dentro de los resultados relevantes de este trabajo está la definición del alcance del dominio, la lista de aspectos, la lista de conceptos y un modelo conceptual que relaciona dichos conceptos.

**Keywords:** Conceptual model, Ontology, Knowledge Base, Support service, Information, Information Technologies.

**1. INTRODUCCION**

El servicio de atención al cliente es a menudo el punto de contacto primario de los clientes con respecto a los productos que ellos utilizan. La productividad de los clientes y la satisfacción con

el producto están influenciadas por sus interacciones con el servicio. Almacenar y consultar la experiencia en la resolución de problemas es un recurso colectivo que debe mantenerse y permitir en gran medida brindar un servicio ágil, oportuno y eficaz al cliente, no sólo

en resolver los problemas de un cliente en particular sino mejorar el conocimiento de la organización.

El objetivo de la ontología es entender el problema en estudio a través de la comprensión del mundo real donde se percibe el mismo, los conceptos asociados al dominio en particular y las relaciones existentes entre dichos conceptos, con el fin de identificar, analizar y especificar los requisitos de la solución a proponer.

En las organizaciones prestadoras de Servicios en TI, existe la necesidad de brindar un servicio de alta calidad, eficiente y continuo e independiente de la localización geográfica de cada uno de sus clientes. En la actualidad se presentan altos niveles de esfuerzo por parte del personal que realiza las tareas de soporte, generando una alta recurrencia de escalados al área de desarrollo por las reiteradas respuestas y/o soluciones, ocasionadas generalmente a la falta de detección de la causa real del problema presentado. No obstante, no existe una cualificación de la información de clientes, incidentes y soluciones aplicadas. Se puede ahorrar mucho tiempo si las experiencias internas fueran compartidas.

ITIL (Biblioteca de la Infraestructura de Tecnología de la Información) especifica un método sistemático que garantiza la calidad de los servicios de TI. Ofrece una descripción detallada de los procesos más importantes en una organización de TI, incluyendo listas de verificación para tareas, procedimientos y responsabilidades que pueden servir como base para adaptarse a las necesidades concretas de cada organización. (van Bon, 2008).

ITIL alberga una guía de mejores prácticas de la industria. Es un marco de trabajo que describe las fronteras de la Gestión de Servicio para la organización. ITIL se centra en la provisión de servicios de alta calidad, con un énfasis especial en las relaciones con el cliente. (OGC, 2006).

Los recursos y las capacidades son tipos de activos que las organizaciones utilizan para crear valor en forma de bienes y servicios. Los recursos forman la entrada directa para la puesta en producción y se convierten en valor a través de la gestión, la organización, el personal y el conocimiento. Las capacidades representan la habilidad de una organización para coordinar, gestionar y aplicar recursos con el fin de producir valor.

Teniendo en cuenta que el trabajo está orientado al conocimiento en la organización para brindar un mejor servicio al cliente, en la primera parte del trabajo se hace una descripción del método usado para la construcción del modelo conceptual. En la siguiente parte se exponen los conceptos asociados a soporte de servicio de TI y base de conocimiento para el soporte. Se plantean los modelos de gestión del conocimiento que soportan la propuesta del modelo conceptual de la estructura de conocimiento. Por último se exponen los subdominios y aspectos identificados en el análisis del modelo usando el método OntosMD.

## 2. EL METODO USADO PARA LA CONSTRUCCION DEL MODELO CONCEPTUAL

La complejidad del dominio empresarial sugiere un conjunto de requisitos que debe cumplir un método para elaborar ontologías en el contexto del modelado de negocios (Rojas et al., 2009).

El método OntosMD (Rojas et al., 2009) es un marco metodológico que describe como construir modelos conceptuales (ontologías) para un dominio determinado. Está basado en conceptos de la Ontología y en procesos y modelos inspirados en la Ingeniería de Software y la Ingeniería de Métodos (Montilva y Barrios, 2006). El método permite elaborar el modelo desde cero o, bien, a partir de ontologías ya existentes, a través de procesos de reingeniería.

El método OntosMD, está integrado por tres modelos estrechamente relacionados. El modelo del producto especifica las características que tiene una ontología de dominio, es decir, describe el producto que se elabora mediante la aplicación del método. El modelo de actores identifica y organiza los roles que deben ejercer los miembros del grupo de trabajo, que participan en la elaboración de una ontología, y describe las responsabilidades que estos actores tienen en la ejecución de las actividades indicadas en el modelo del proceso. Este último organiza, a través de procesos, las actividades que los actores deben ejecutar para elaborar una ontología.

El modelo del producto establece las características generales de las ontologías que el método puede elaborar (Figura 1). Identifica y describe, además, los productos que los actores deben elaborar durante el uso del método.

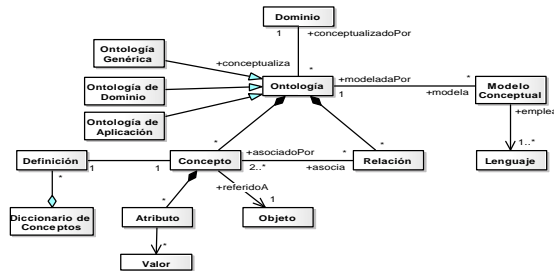


Fig. 1. Modelo conceptual de las ontologías que produce OntosMD

La aplicación del método genera, entre otros, los siguientes productos:

- Lista de aspectos y conceptos.- Enumera el conjunto de aspectos que serán tratados en la ontología y los principales conceptos asociados al dominio.
- Diccionario de Conceptos.- Contiene un conjunto ordenado alfabéticamente de definiciones asociadas a los conceptos de la ontología.

Modelo Conceptual.- Conjunto de diagramas de clases elaborados usando UML. Estos diagramas modelan los conceptos de la ontología y sus relaciones de asociación, agregación, composición y generalización / especialización.

### 3. EL CONCEPTO DE SOPORTE DE SERVICIO DE TI

Se especifica el concepto de soporte de servicio de TI, definidos a partir de los diferentes términos que componen este concepto. (van Bon, 2008).

Servicio. Un medio de entregar valor a los clientes facilitando resultados que los clientes quieren lograr sin conseguir Costes o Riesgos específicos.

Servicio de TI. Servicio proporcionado a uno o más clientes por un proveedor de servicios de TI. Un servicio de TI se basa en el uso de las Tecnologías de Información y soporta los procesos de Negocio del cliente. Un servicio de TI se compone de una combinación de personas, procesos y tecnología y debería estar definido en un Acuerdo de Nivel de Servicio<sup>1</sup> (Se hace necesario definir ANS, puede ser en un glosario o al pie de esta página).

<sup>1</sup> Acuerdo de Nivel de Servicio (SLA, por sus siglas en inglés, Service Level Agreement). Acuerdo entre un Proveedor de Servicio de TI y un Cliente. El SLA describe el Servicio de TI, documenta los Objetivos de Nivel de Servicio y especifica las responsabilidades del Proveedor de Servicio de TI y del Cliente

Gestión de Servicios. Conjunto de capacidades organizativas especializadas cuyo fin es generar valor para los clientes en forma de servicios.

Para organizaciones de Gestión de Servicios de TI se creó el estándar ISO/IEC 20000 que enmarca los procesos de la gestión en 4 áreas: Procesos de Provisión de Servicio, Procesos de Control, Procesos de Entrega, Procesos de Resolución y Procesos de Relación.

Soporte del Servicio. El elemento de soporte del servicio garantiza que el cliente tenga el acceso adecuado a los servicios que soportan funciones de negocios.

### 4. CONCEPTO DE LA BASE DE CONOCIMIENTO PARA EL SOPORTE

La base de conocimiento permite la consolidación del conocimiento de la organización, la gestión de listas de preguntas y repuestas con base en experiencias reales, inclusión de nuevas soluciones en la misma, el manejo de información no estructurada y la agilidad y disponibilidad en la prestación del servicio.

La base del Sistema de Gestión del Conocimiento del Servicio (SKMS) (Van Bon, 2008) está formada por una considerable cantidad de datos en una base de datos central o Sistema de Gestión de la Configuración (CMS) y la Base de Datos de Administración de la Configuración (CMDB). La CMDB envía datos al CMS, que a su vez facilita información al sistema SKMS para facilitar el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, el sistema SKMS tiene un ámbito más amplio, ya que también almacena información sobre aspectos como:

- Experiencia y conocimientos del personal
- Temas periféricos, como el comportamiento de los usuarios y el rendimiento de la organización
- Requisitos y expectativas de proveedores de servicios y asociados.

En detalle la información almacenada estaría relacionada con:

- El negocio, clientes, proveedores, usuarios
- Servicios: Información relacionada con la cartera de servicios, el catálogo de servicios, el modelo del servicio, la entrega del servicio y el cambio del servicio
- Las aplicaciones
- Asignación de la infraestructura



## 5. MODELO DE GESTION DE CONOCIMIENTO

(Kerschberg, 2001) presenta un Modelo de Procesos de Gestión del Conocimiento para establecer una arquitectura de tres capas: Capa de Representación del Conocimiento, Capa de Gestión del Conocimiento y Capa de Datos. El Modelo intenta relacionar los diferentes Procesos (Actividades) de la Gestión del Conocimiento con los Datos (Recursos de Conocimiento) y finalmente su Representación.

Los Procesos son:

1. Adquisición: En este proceso, los Ingenieros del Conocimiento capturan el conocimiento de los expertos en un dominio, mediante entrevistas, estudio de casos, etc.
2. Refinamiento: En este proceso se captura el conocimiento de diversas fuentes, como Bases de Datos Relacionales (BDRs) o Bases de Datos Orientadas a Objetos (BDOOs), Transacciones, Correo-e, chats, foros, etc. Dicho conocimiento se identifica, clasifica y relaciona, estableciendo los meta-datos necesarios para los conceptos y relaciones del dominio.
3. Almacenamiento y Recuperación: Los datos obtenidos se almacenan e indexan para obtener consultas rápidas, a partir de conceptos, palabras clave, etc.
4. Distribución: El conocimiento se puede distribuir mediante un Portal Corporativo, Mensajería Electrónica o Servicios de Suscripción.
5. Presentación: El conocimiento debe poder presentarse teniendo en cuenta los intereses de cada usuario, y permitiendo la colaboración entre éstos de cara a poder compartir el conocimiento tácito y combinarlo con el explícito en la resolución de problemas.

A partir de dicho Modelo de Procesos, (Kerschberg y Weishar, 2002) proponen un Modelo Conceptual de Sistema de Gestión del Conocimiento (Figura 2), también basado en tres capas:

- Capa de Presentación y Creación del Conocimiento: En esta capa los trabajadores del conocimiento pueden obtener información personalizada a través del Portal, realizar peticiones de búsqueda de información especializadas, colaborar en la creación de nuevo conocimiento o transformar conocimiento tácito en explícito mediante grupos de discusión.

- Capa de Gestión del Conocimiento: En esta capa se encuentran los servicios *middleware* asociados con la indexación del conocimiento y los Servicios de Integración de la Información (SII).
- Capa de Datos: En esta capa se encuentran todas las fuentes de datos de la organización.

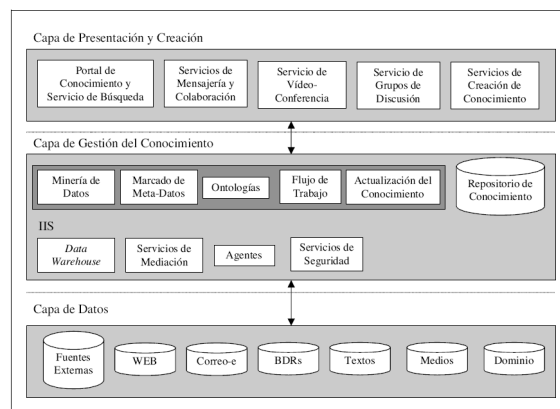


Fig. 2. Modelo Conceptual del Sistema de Gestión del Conocimiento

## 6. MODELO CONCEPTUAL DE LA ESTRUCTURA DE CONOCIMIENTO

Para poder llevar a cabo la coordinación del servicio de soporte de TI es preciso desarrollar un modelo conceptual para la construcción de una base de conocimiento. Para ello, la herramienta más apropiada es la Ontología, que nos permite definir los elementos al nivel de conocimiento en el dominio. (Figura 3).

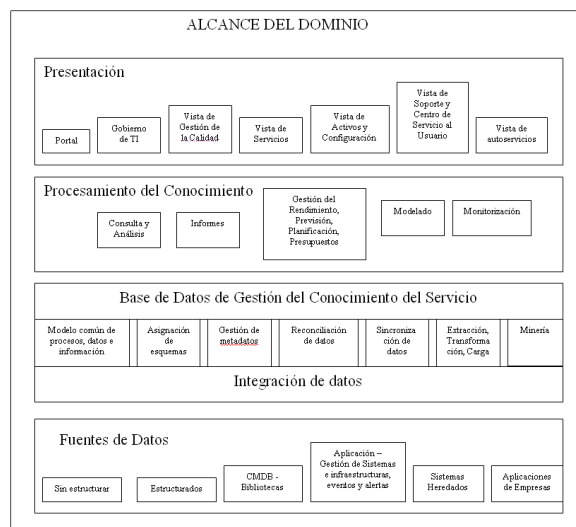


Fig. 3. Alcance del dominio

## 6.1. Subdominios

Los submodelos identificados, son los del nivel de datos, nivel de integración, nivel de procesamiento y nivel de presentación. Estos subdominios se detallan a continuación:

### 6.1.1. Subdominio de datos

El subdominio de datos contiene las herramientas y fuentes de datos e información.

1. Información no estructurada
2. Bases de datos con información estructurada: documentos y archivos
3. La CMDB y la biblioteca de medios definitivos (software, documentación, multimedia)
4. Las aplicaciones, gestión de sistemas e infraestructuras. La gestión de eventos y alertas.
5. Los sistemas heredados
6. Las aplicaciones de la empresa: Gestión de accesos, Recursos Humanos, Gestión de la cadena de suministro, Gestión de las relaciones con los clientes.

A este nivel, es posible que el Sistema de Administración de la Configuración reciba información de distintas CMDB que combinadas forman una CMDB federada. Algunos elementos de un servicio podrían estar externalizados, mientras que otros se pueden realizar en la propia organización. En este caso, el Sistema de Administración de la Configuración necesitará datos de CMDB distintas controladas por (y propiedad de) las diferentes partes.

Es posible definir varias bibliotecas:

- Una biblioteca segura es una colección de software y elementos de configuración electrónicos o documentales, de tipo y estado conocidos.
- Un almacén seguro es un lugar donde se almacenan activos de TI de forma segura.
- La Biblioteca de Medios Definitivos (DML) es un almacén seguro en el que se conservan y protegen versiones definitivas y autorizadas (aprobadas) de todos los elementos de configuración de medios.
- Los repuestos definitivos se mantienen en una zona apartada para el almacenamiento seguro de repuestos de hardware definitivo.

### 6.1.2. Subdominio de integración

El subdominio de Integración de datos, contiene los procesos necesarios para la integración de los datos que permitan consolidar la información en una base de conocimiento del servicio. Entre ellos están:

1. Modelo común de procesos, datos e información
2. Asignación de esquemas
3. Gestión de metadatos
4. Reconciliación de datos
5. Sincronización de datos
6. Procesos de extracción, transformación y carga
7. Minería de datos.

### 6.1.3. Subdominio de procesamiento

Las actividades dominantes de la Administración del conocimiento alrededor de datos son la capacidad a (Van Bon, 2008):

- Capturar datos exactos
- Analizar, sintetizar, y transformar los datos en información.
- Identificar datos relevantes y concentrar recursos sobre su captura.

El subdominio de Procesamiento del Conocimiento provee los mecanismos necesarios para gestionar la información necesaria para:

1. Consulta y análisis
2. Informes
3. Gestión del Rendimiento, Previsión, Planificación, Presupuestos
4. Modelado
5. Monitorización: cuadros de mando, paneles de control, alertas

### 6.1.4. Subdominio de presentación

Contiene las vistas necesarias a los diferentes grupos que permiten: Buscar, explorar, almacenar, recuperar, actualizar, publicar, suscribir y colaborar. Entre ellas están:

1. Portal
2. Gobierno de TI: Portafolio del Servicio, Informes, Mejora Continua, Riesgos.
3. Vista de Gestión de la calidad: Políticas, procesos, procedimientos, formularios, plantillas, listas de chequeo. Vista de formación y aprendizaje.
4. Vista de Servicios: Panel de control, Catálogo de servicios, Combinaciones de

funcionalidades y garantías de servicios, Paquetes de informes del servicio.

5. Vista de Activos y Configuración: Activo Financiero, Información de CMS, Informes de Estado, Datos de CMDB, Fuentes definitivas.
6. Vista de Soporte y Centro de Servicio al usuario: Catálogo de servicios, clientes, usuarios, interesados, activos, incidencias, problemas, cambios, versiones, rendimiento de configuraciones.
7. Vista de Autoservicios: Catálogo de productos y servicios, Contactos, FAQs, Compras en línea, Mis activos (adquisición, instalación, movimiento, adición, monitorización / procesos de cambios).

## **6.2. Aspectos**

La Gestión de Servicios de TI, es llevada a cabo por los Proveedores de Servicios de TI a través de la combinación apropiada de personas, procesos y tecnologías de la información. En el estudio realizado de la aproximación que coloca especial énfasis a la importancia de la coordinación y el control a través de las diferentes funciones, procesos y sistemas necesarios para gestionar el Ciclo de Vida de los Servicios de TI se identificaron 12 procesos y una función que son definidos a continuación.

### **6.2.1. Gestión del conocimiento**

Proceso responsable de recoger, analizar, almacenar y compartir conocimiento e información dentro de una organización. El propósito de la Gestión del Conocimiento es mejorar la calidad del proceso de toma de decisiones (de la dirección) haciendo que durante el Ciclo de Vida del Servicio se disponga de información segura y confiable.

### **6.2.2. Gestión del nivel de servicio**

Proceso responsable de negociar y asegurar el cumplimiento de los acuerdos de niveles de servicio. La meta del proceso es garantizar que todos los procesos de Gestión del Servicio de TI, acuerdos de nivel operacional y contratos de soporte son adecuados a los objetivos de nivel de servicio. El proceso monitoriza y reporta los niveles de servicio y mantiene revisiones periódicas con el cliente.

### **6.2.3. Gestión de la cartera de servicios**

Proceso responsable de gestionar la cartera de servicios. Una cartera de servicios describe los

servicios de un proveedor en términos de valor para el negocio. Articula las necesidades del negocio y la respuesta del proveedor de servicio ante ellas.

### **6.2.4. Gestión del catalogo de Servicios**

El propósito es proporcionar una fuente única de información de todos los servicios acordados, y garantizar su completa disponibilidad para aquellos que hayan sido autorizados a su acceso.

### **6.2.5. Gestión de la configuración**

Proceso responsable de mantener la información sobre los Elementos de Configuración requeridos para la provisión de un Servicio de TI, incluyendo las Relaciones entre ellos.

### **6.2.6. Gestión del cambio**

Proceso responsable del control del ciclo de vida de los cambios. El objetivo primario de Gestión del Cambio es permitir la ejecución de los cambios, con la mínima afectación a los Servicios de TI.

### **6.2.7. Gestión de versiones y despliegue**

El objetivo de la Gestión de Versiones y Despliegues es construir, probar y desplegar los servicios especificados y garantizar que el cliente utiliza el servicio de manera eficaz.

### **6.2.8. Gestión de eventos**

Proceso responsable de la gestión de eventos a lo largo de su ciclo de vida. Un evento es un suceso que afecta a la gestión de infraestructura de TI o a la provisión de un servicio de TI. En general, los eventos son notificaciones generadas por un servicio de TI, un elemento de configuración o una herramienta de monitorización.

### **6.2.9. Gestión de incidencias**

El objetivo del proceso de Gestión de Incidencias es restaurar el fallo del servicio lo antes posible para los clientes, de manera que su impacto sobre el negocio sea mínimo. Las incidencias pueden ser fallos, preguntas o consultas. La Gestión de Incidencias incluye cualquier evento que interrumpa o pueda interrumpir un servicio; esto significa que también incluye los eventos comunicados por los clientes, ya sea el Centro de Servicio al Usuario o a través de herramientas diversas.

**6.2.10. Gestión de peticiones**

La gestión de peticiones (implementación de peticiones) procesa peticiones de servicio de los usuarios. Una petición de servicio es una solicitud de información, asesoramiento, cambio estándar o acceso a un servicio por parte de un usuario.

**6.2.11. Gestión de problemas**

La Gestión de Problemas es responsable de analizar y resolver las causas de las incidencias. También desarrolla actividades proactivas para evitar incidencias presentes y futuras; para ello utiliza el llamado “subproceso de errores conocidos”, que permite obtener diagnósticos rápidos cuando se producen nuevas incidencias.

**6.2.12. Gestión de proveedores**

La meta del proceso de Gestión de Proveedores es gestionar a los proveedores y los servicios que proporcionan, con el fin de conseguir una calidad consistente de los servicios de TI al negocio, garantizando un precio adecuado.

**6.2.13. Centro de servicio al usuario**

El Centro de Servicio funciona como punto de contacto único para los usuarios de TI y se encarga de procesar todas las incidencias y peticiones de servicio. El objetivo básico del Centro de Servicio al Usuario es restaurar el servicio “normal” en el menor tiempo posible. Para ello puede ser necesario solucionar un error técnico, satisfacer una petición de servicio o responder una pregunta.

análisis del modelo conceptual, logrando entender el problema a través de la comprensión del mundo real donde se percibe el mismo, los conceptos asociados al dominio en particular y las relaciones existentes entre los conceptos, con el fin de identificar, analizar y especificar los requisitos de la solución a proponer.

**REFERENCIAS**

- Kerschberg L. “Knowledge Management in Heterogeneous DataWarehouse Environments”. International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery, LNCS 2114, Springer-Verlag.
- Kerschberg L. y Weishar D. “Conceptual Models and Architectures for Advanced Information Systems”. Applied Intelligence, 13 (2).
- Montilva, J. y Barrios, J. (2006). Mejorando la calidad del software a través del modelado de procesos. Actas de la III Conferencia Internacional IEEE del Área Andina (ANDESCON-2006). Quito, Ecuador, 8-10 de Noviembre 2006.
- O.G.C., Office of Government Commerce. (2006). Soporte de Servicio. Primera edición. TSO. Reino Unido. 2006
- Rojas, M., Montilva, J. y Barrios, J. (2009). "OntosMD: Un método para hacer ontologías durante el modelado de negocios". Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol.1, Número 13, 2009.
- van Bon, Jan y Otros. (2008). Transición del Servicio basada en ITIL V3. Van Haren Publishing. Holanda. Septiembre, 2008.

**7. CONCLUSIONES**

Sobre la relación entre la gestión del conocimiento y las tecnologías de la información, es necesario reiterar que cuando una organización decide utilizar tecnologías relacionadas con la gestión del conocimiento con el propósito de hacer que esas herramientas lleven a una mejora de los procesos de la organización, o para instrumentar cambios organizativos o de cultura, se deben establecer los lineamientos técnicos y metodológicos necesarios, a partir de un análisis de los recursos disponibles.

En la construcción del modelo de la estructura de conocimiento se han utilizado métodos ontológicos de base empresarial y modelos de gestión de conocimiento que junto a las mejores prácticas de ITIL facilitan la comprensión del dominio y

Recibido: 29 de marzo de 2009  
Aceptado: 28 de mayo de 2009**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BARRIER EVADER AUTONOMOUS  
VEHICLE USING NEURAL NETWORKS IN A DIGITAL SIGNAL PROCESSOR  
DSP56F801****DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN VEHICULO AUTONOMO EVASOR DE  
OBSTACULOS EMPLEANDO REDES NEURONALES EN UN PROCESADOR  
DIGITAL DE SEÑALES DSP56F801****PhD. Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero, Ing. Carlos Alberto Gamarra Sierra****Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 164

E-mail: oscar.gualdron@unipamplona.edu.co; carlos\_gamarra@hotmail.com

**Abstract:** This paper deals with the design and implementation of an autonomous vehicle capable of avoiding obstacles in real time controlled by a neural network, we will use sensors to learn about their environment and take action to avoid collision, the control was implemented in a Digital Signal Processor DSP56F801 from Motorola.

**Resumen:** Este trabajo trata sobre el diseño y la aplicación de un vehículo autónomo capaz de evitar obstáculos en tiempo real controlado por una red neuronal artificial, se utilizaron sensores para aprender sobre su entorno y tomar medidas para evitar la colisión, el control fue implementado en un Procesador de Digital de Señales el DSP56F801 de Motorola.

**Keywords:** DSP, Microbot, Artificial Neural Networks.

**1. INTRODUCCION**

Los microbots han tenido un auge en los últimos años por la reducción de costos de sus componentes y la facilidad de adquirirlos, hoy en día son utilizados por las industrias, las universidades y cualquier persona con un interés en ellos.

La ciencia aplicada que surge de la combinación de la tecnología de maquinas-herramientas y la informática o bien llamada robótica, amplía su rendimiento integrándola a una forma de computación nueva como son las redes neuronales, que son redes interconectadas masivamente en paralelo con elementos simples, las cuales

intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico.

Al ser implantadas las redes neuronales artificiales en un procesador digital de señales para aplicaciones de microbótica, brinda la oportunidad de un procesamiento rápido con una precisión elevada, tolerancia a fallos con un bajo costo.

Para la elaboración de un microbot evasor de obstáculos se parte de la adquisición de datos del entorno por medio de sensores para realizar operaciones propias de la red neuronal en el DSP, obteniendo una respuesta que evita la colisión.



## 2. DISEÑO DEL MICROBOT

El robot móvil, es capaz de detectar la presencia de obstáculos a su alrededor y evaluar por medio de redes neuronales la forma de evitarlos.

Para la elaboración de este microbot se tuvo en cuenta la funcionalidad que este debía poseer, una estructura fuerte, debió ser económico, fácil de modificar.

Después de analizar las diferentes Estructuras se escogió por su tamaño reducido y simplicidad la estructura mostrada en la figura 1, otro factor que se tuvo en cuenta fue la experiencia al trabajar previamente con esta clase de estructura mecánica.

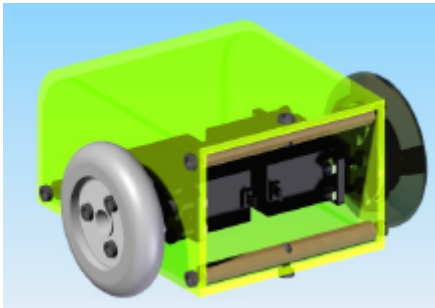


Fig. 1. Vista microbot

### 2.1. Sistema de tracción

La tracción diferencial es la más utilizada por su simplicidad, permitiendo realizar giros y avanzar solo controlando el sentido de las ruedas.

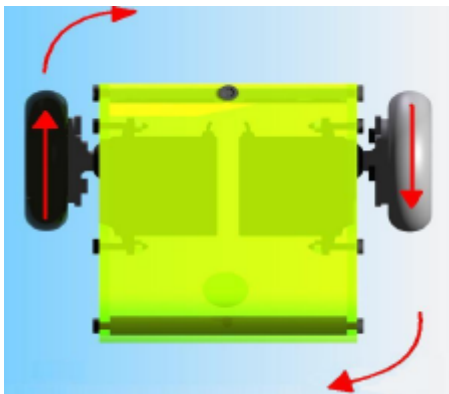


Fig. 2. Ejemplo tracción diferencial. Propiedad autor de este trabajo

### Servomotor

Los servomotores al ser trucados para que giren 360 grados con el circuito de control interno son una opción eficiente para el funcionamiento del vehículo objeto de este trabajo, ahorrando el circuito de cambio de giro.



Fig. 3. Servomotor Futaba s3003

### 2.2. Acople del DSP56F801 al servo motor

Dado que el nivel de tensión máxima que emplea el DSP56F801 es de 3,3V y no está en el rango de operación de los servomotores la cual es de 5V, se hace necesario realizar un acondicionamiento de esta señal para garantizar niveles de tensión compatible.

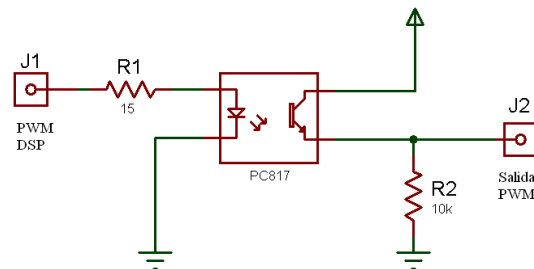


Fig. 4. Esquema circuito acople DSP56F801 al Servomotor

Para el cálculo de la resistencia R1, se aplica la siguiente fórmula, donde  $V_{DSP}$  es el voltaje máximo del DSP,  $V_D$ , Voltaje de trabajo del diodo led interno del opto acoplador; y  $I_D$  la corriente máxima de trabajo del diodo del opto acoplador.

$$R_1 = \frac{V_{DSP} - V_D}{I_D} \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{3.3V - 3V}{20mA} = 15 \Omega \quad (2)$$

### 2.3. Fuente de potencia

La fuente de poder será la encargada de suministrar la alimentación al robot móvil para realizar la función de diseño, hay que tener en cuenta el consumo del vehículo para garantizar que en un futuro la energía que tenemos sea suficiente.

Se calcula una corriente de 401 miliamperios. Sin considerar que los motores al estar sometidos a una carga requieren mayor energía, para esto se le agrega un 25% más a la corriente calculada. Obteniendo un total de 501,25 miliamperios como máximo.

#### Acondicionamiento de la fuente de poder

El vehículo requiere una alimentación de 5 Voltios, tanto para los servomotores como para los sensores, para ello se conecto dos baterías de 3.6 V en serie.

Para garantizar la estabilidad y nivel de voltaje del suministro de energía se empleo un regulador LM7805, conectándolo según las recomendaciones del fabricante.

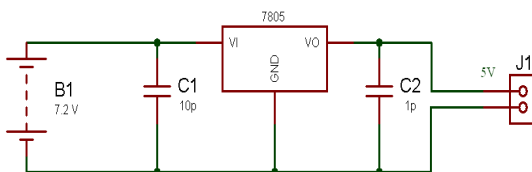


Fig. 5. Circuito acondicionador de tensión

Este circuito regulara el voltaje de entrada, garantizando una tensión de 5V aproximadamente, con una corriente máxima de 1 A. los condensadores son utilizados como eliminadores de señales parasitas.

### 2.4. Sensor de proximidad

El vehículo al ser un evasor de obstáculo debe conocer su entorno, para ello se seleccionó el sensor de proximidad de la familia Sharp IS471F por su inmunidad a la luz visible, facilidad de calibración, tamaño y su grado de sensibilidad.

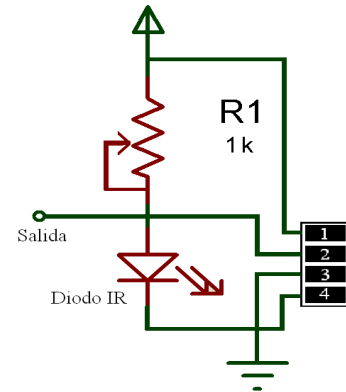


Fig. 6. Esquema muestra el funcionamiento del sensor

### 2.5. Control del vehículo

El dispositivo encargado del procesamiento de las señales, donde se implementará la red neuronal es el DSP56F801 de Motorola, un poderoso procesador digital de señales con una frecuencia de núcleo de 80 megahertz.

### 2.6 Estado del vehículo

Con esto la estructura física del vehículo se encuentra terminada, solo resta la implementación de software para poder así realizar las diferentes calibraciones y pruebas del funcionamiento.



Fig. 7. Vehículo Neurobot

## 3. DISEÑO DEL SOFTWARE DE CONTROL

El sistema de control es el encargado del procesamiento de las señales que afecte al microbot neurobot para tomar las acciones correspondientes. Para esta aplicación se emplea una red neuronal por su poca utilización en robótica móvil.

### 3.1. Selección de la red neuronal

La red neuronal de Retro-propagación es la adecuada para llevar a cabo el proceso de control del microbot, debido a su relativa facilidad de implantación, y a sus características como clasificador.

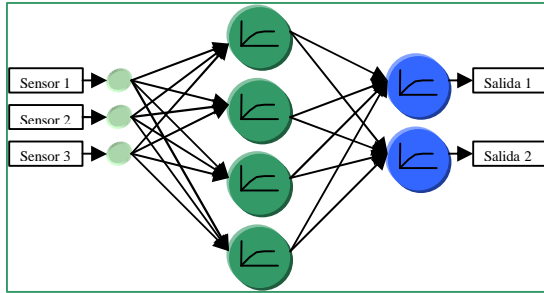


Fig. 8. Estructura red neuronal

### 3.2. Entrenamiento de la red neuronal

El entrenamiento de la red neuronal es realizado por Matlab®. El cual arroja los pesos sinápticos necesarios para la integración de está al DSP56F801.

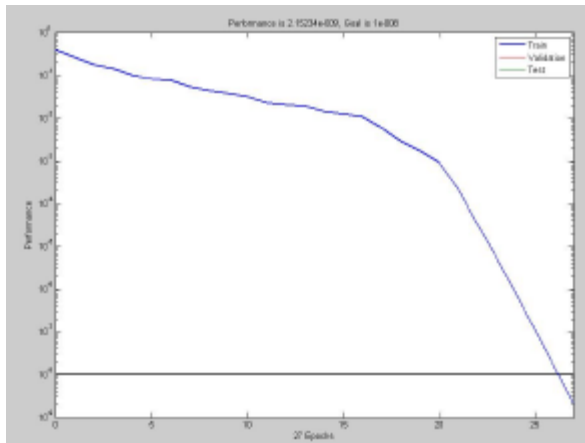


Fig. 9 Red neuronal con 4 neuronas

Se aprecia en la fig. 9 que la red neuronal se entrenó satisfactoriamente con un error significativamente bajo.

### 3.3. Integración al DSP56F801

Para la integración con el DSP56F801 se emplean:

- Los pesos sinápticos de la capa de entrada a la capa oculta.
- Los pesos de la capa oculta a la capa de salida.

- Los *Bias*, que son los pesos extras.
- Así como conocer qué tipo de función de activación fue empleada. En la capa oculta *Tansig* y en de salidas *logsin*.

Para obtener los pesos de la capa de entrada a la capa oculta se utiliza el comando “red.IW”, para los pesos de la capa oculta a la capa de salida “Red.LW”, y para los *bias* se obtiene con “Red.b”. Los pesos y las *bias* son guardados en la memoria del DSP56F801, para ser aplicadas a las formulas de verificación de la red MLP las cuales son las siguientes:

$$n_j^o = \sum_{i=1}^q W_{ji}^o P_i + b_j^o \quad (3)$$

$W_{ji}^o$ : Peso que une la capa de entrada con la capa oculta

$P_i$ : Componente del vector de entrada.

$b_j^o$ : Ganancia de la capa oculta, pesos extra de la red.

Esta fórmula multiplica cada entrada con su respectivo peso y luego le suma la bias correspondiente a cada neurona.

Cada una de las neuronas de la capa oculta posee una salida dada por:

$$a_i = \text{tagsig} \left( \sum_j w_{ji} P_i - b_j^o \right) = \frac{e^{n_j^o} + e^{-n_j^o}}{e^{n_j^o} - e^{-n_j^o}} \quad (4)$$

Donde *tansig* es la función de activación de la capa oculta.

La salida de cada neurona es la entrada de los pesos de la capa oculta a la capa de salida:

$$s_i = \left( \sum_j w_{ij} a_j + b_i^1 \right) \quad (5)$$

$w_{ij}$ : son los pesos que conectan la capa oculta con la capa de salida.

$b_i^1$ : son los pesos complementarios de la capa de salida.

La salida total de la red es  $n_k$ :

$$n_k = \log \text{sig} \left( \sum_j s_j w_{kj} + b_j^o \right) = \frac{1}{1 + e^{-s_j}} \quad (6)$$

Los pesos que conectan a la capa de entrada con la capa oculta fueron guardados en una matriz  $W1$ , con cuatro filas y cinco columnas; Las variables de

entradas son adquiridas y guardadas en el vector P; los pesos que conectan la capa oculta con la capa de salida son guardados en la matriz W2 de tres filas y cuatro columnas; la *bias* que corresponde a la capa oculta fue guardada en un vector de cinco posiciones b1 y por último la *bias* de la capa de salida en un vector de tres posiciones b2.

La salida de esta red decide la acción a seguir para que pueda evitar los obstáculos que se presenten. Utilizando los servomotores como actuadores que posicionaran al vehículo en una posición segura.

Gracias a la exactitud del DSP56F801 al trabajar con puntos flotantes la salida de la red es equivalente a la procesada por MatLab. Siendo un éxito la integración de la red neuronal al DSP56F801.

#### 4. CONCLUSIONES

Las limitaciones de memoria del DSP56F801 sólo permitieron una red neuronal de cuatro neuronas impidieron realizar aplicaciones extras más complejas. La red neuronal es capaz de dar una respuesta a casos que no se tuvieron en cuenta en el entrenamiento, siendo un sistema de control confiable y tolerante a fallos.

La función de un sistema puede ser cambiada con sólo la sustitución de los pesos de la red neuronal, mejorando su flexibilidad.

El control del vehículo fue sencillo debido al sistema de tracción diferencial que se empleó, solo fue necesario cambiar el sentido de giro de las ruedas para girar o avanzar.

Los sensores que se emplearon satisficieron las necesidades de este trabajo de grado. Por su precisión, facilidad de calibración, y tamaño, logrando un diseño confiable para la implementación y manejo de las redes neuronales de retropropagación.

El empleo de redes neuronales resulta atractivo para el mejoramiento de sistemas que empleen otras lógicas de control, mejorando considerablemente su desempeño. Teniendo en cuenta el nivel de hardware que se utilizó para lograr una aproximación considerable. Para determinar el número de neuronas a utilizar se utilizó el criterio del autor, ya que no existe ninguna regla que lo determine.

#### 5. RECOMENDACIONES

Se sugiere para investigaciones futuras realizar un entrenamiento online de la red neuronal. Para aplicaciones más avanzadas se recomienda quitar la carga computacional del DSP56F801 y entregársela a un procesador con mayores recursos.

Se recomienda el uso de técnicas de odometría, junto con sensores como giroscopios, brújula electrónica, encoder y otros que permitan garantizar la posición del microbot en el espacio.

Se recomienda el uso de más sensores de proximidad para tener un mejor conocimiento del entorno siempre y cuando se libere al microbot de la carga computacional de la red neuronal.

#### REFERENCIAS

- Kartalopoulos, S. V. *Biological neural networks. In Understanding Neural Networks an Fuzzy Logic Basic Concepts and Applications*. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., New York, 1996.
- Vivas, R. L. Pasantía: *Estudio de métodos de inteligencia artificial y desarrollo de códigos y aplicativos en Matlab para el modelamiento de sistemas basados en árboles de decisión, lógica difusa y redes neuronales*. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia, 2005. P.25
- Patiño, H. D. *Apuntes Curso Introducción a las redes Neuronales Artificiales en Ingeniería* (Rama Estudiantil IEEE de la UNSJ), San Juan, Argentina, 2000.
- Guzzo, M. A. Garguilo, E. Patiño, H. D. *Diseño y desarrollo de un Neuro-chip basado en FPGAs*. Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina. P-24
- Bond and L. Gasser. "An analysis of problems and research in DAI". In A. H. Bond and L. Gasser, editors, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, pages 3–36. Morgan Kaufmann Publishers: San Mateo, CA, 1988.
- Asada M., Stone P, Kitano H., Drogoul A. *The RoboCup Physical Agent Challenge: Goals and Protocols for Phase I*. Kitano Hiroaki (Eds). (1998). RoboCup '97: Robot Soccer World Cup I. Lectures Notes in Computer Science; Vol 1935: Lectures Notes in Artificial Intelligence. Berlin: Springer-Verlag.

Moctezuma, Eugenio y Huitzil, Cesar. *Estudio sobre la implementación de redes neuronales artificiales usando Xilinx System Generator*. Puebla, México. P.I. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Gualdrón G., O. *Redes neuronales, Apuntes de Clases*, Universidad de Pamplona, Colombia, 2008.

Gutiérrez, J. *Introducción a las redes neuronales*, Universidad de Cantabria, 2000.

Larrañaga, P.; Iñaki, I. y Abdelmalik, M. *Redes neuronales*, Universidad Carlos III, Madrid, España, 2007.

Matich, D. *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y aplicaciones*, 2001.

## DIRECCIONES WEB

<http://www.microrrobotica.es>, (Biblia CT6811)

<http://www.eupmt.es/cra/>

<http://www.jeuazarru.com/html/microbots.html>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Servomotor>

<http://www.alldatasheet.com>. (DSP56F801)



Recibido: 12 de marzo de 2009  
Aceptado: 08 de mayo de 2009**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROBLEM OF SECONDARY  
DISTRIBUTION SYSTEM PLANNING****MODELAMIENTO MATEMATICO DEL PROBLEMA DEL PLANEAMIENTO  
DE SISTEMAS SECUNDARIOS DE DISTRIBUCION****Ing. Julián D. González Hoyos, PhD. Ramón A. Gallego Rendón**  
**MSc. Ricardo A. Hincapié Isaza****Universidad Tecnológica de Pereira**Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Eléctrica  
La Julita, Pereira, Colombia

E-mail: {jdgonzalez, ragr, ricardohincapie}@utp.edu.co

**Abstract:** This paper presents a general mathematical model for the problem of planning of secondary distribution systems, which takes into account the location and sizing of secondary feeders and distribution transformers, the cost of repowering existing feeders and transformers, the cost of swing phase, the system operating costs and fixed costs incurred in the relocation of distribution transformers. The restrictions include nodal power balance, the maximum permitted in the capacity of the feeders and transformers, the maximum permissible voltage drop in system nodes and the maximum amount of investment available. The contribution of this paper lies in formulating a mixed integer nonlinear model involving each of the aspects considered by different authors in the literature on this subject, which allows it to be solved using optimization methods and adapted to different circumstances according to the criteria of the engineer in charge of planning the distribution system.

**Resumen:** En este trabajo se presenta un modelo matemático general para el problema del planeamiento de sistemas secundarios de distribución, el cual tiene en cuenta la ubicación y dimensionamiento de alimentadores secundarios y transformadores de distribución, el costo de repotenciación de alimentadores y transformadores existentes, el costo del balanceo de fases, los costos operativos del sistema y los costos fijos ocasionados por la reubicación de transformadores de distribución. Las restricciones planteadas incluyen el balance de potencia nodal, los límites máximos permitidos en la capacidad de los alimentadores y transformadores, las máximas caídas de tensión admisibles en los nodos del sistema y la partida máxima de inversión disponible. El aporte de este trabajo radica en la formulación de un modelo no lineal entero mixto que involucra cada uno de los aspectos considerados por diferentes autores dentro de la literatura especializada en esta temática, el cual permita ser resuelto usando métodos de optimización y adaptado a diferentes circunstancias de acuerdo a los criterios del ingeniero encargado de la planeación de un sistema de distribución.

**Keywords:** Secondary distribution system, mathematical modeling, combinatorial optimization.

## 1. INTRODUCCION

El constante crecimiento de la población, la industria y el comercio ocasionan un incremento en la demanda de energía. Este crecimiento de la carga está directamente relacionado con la expansión de los sistemas de distribución debido a la necesidad de abastecerla adecuadamente. La forma en que se realice la expansión de estos sistemas se conoce como el planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica (PSDE). Esta planeación debe garantizar un equilibrio técnico y económico para las empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica con el fin de proporcionarles a los usuarios un servicio seguro y confiable y a un precio justo.

El PSDE ha sido tratado en la literatura especializada de diversas maneras. Las variantes que se presentan en la forma en que se aborda este tema obedecen a diferentes modelos matemáticos, técnicas de solución, planeación estática o dinámica, si tiene una única función objetivo o si es multiobjetivo y de acuerdo a la parte del sistema de distribución a planear.

Con respecto a este último aspecto, los sistemas de distribución se han dividido en dos subsistemas para realizar la planeación: el sistema primario (MT) y el sistema secundario (BT).

La planeación de sistemas de MT involucra la ubicación y dimensionamiento de nuevas subestaciones y alimentadores primarios, la ampliación de subestaciones existentes y la reconductorización de alimentadores primarios existentes (Bazán *et al.*, 2002; Ramírez *et al.*, 1994; Granada *et al.*, 2005; Almeida *et al.*, 2002).

La planeación de sistemas de BT considera la ubicación y dimensionamiento de nuevos transformadores de distribución y alimentadores secundarios, el cambio de transformadores nuevos por unos de mayor capacidad y la reconductorización de alimentadores secundarios existentes. Esta planificación tiene como propósito principal determinar la configuración óptima de la red, cuantificar el costo de inversión y ubicar el momento en el tiempo para la construcción de las distintas partes de la red con el fin de alcanzar costos globales mínimos asociados a la operación, expansión y construcción de dicho sistema. Este proceso debe estar enmarcado dentro del cumplimiento de ciertos requisitos técnicos.

El problema de la planeación de estos sistemas se ha considerado en la literatura especializada como una

minimización de una función objetivo que involucra los costos fijos o de inversión y los costos variables o de operación asociados a la expansión (Yoshimoto, 2003; Cossi *et al.*, 2005; Souza, 2006).

Yoshimoto (2003) presenta una metodología para el planeamiento de redes secundarias de distribución que busca minimizar los costos a través de métodos heurísticos de optimización. Esta metodología es trabajada en tres etapas donde la primera consiste en la ubicación de los transformadores de distribución empleando el método de las p-medianas. La segunda etapa consiste en la ubicación de los alimentadores secundarios por medio de un algoritmo que obtiene los caminos mínimos. Finalmente se emplea un problema de Steiner para la conexión de los transformadores de distribución a la red primaria.

Cossi *et al.* (2005) plantean el problema como un modelo no lineal entero mixto, el cual involucra en la función objetivo los costos fijos de la instalación de elementos nuevos (alimentadores secundarios, transformadores de distribución), de reubicación de transformadores de distribución existentes y del balanceo entre fases. Adicionalmente involucra los costos variables asociados a las pérdidas del sistema expresadas en forma cuadrática. El problema es solucionado por medio de Algoritmos Evolutivos.

Souza (2006) soluciona el problema usando un algoritmo de Búsqueda Tabú. El modelo matemático empleado considera una función objetivo que minimiza los costos fijos y variables que reflejan la expansión y operación de los elementos del sistema de distribución secundario. Los costos de inversión representan la instalación de estructuras, conductores y transformadores de distribución. Los costos variables representan las pérdidas del sistema. El modelo matemático es del tipo no lineal entero mixto.

Marroquín (2008) propone una metodología para solucionar el problema usando un algoritmo basado en colonia de hormigas. La función objetivo considera los costos fijos y variables de los diferentes elementos del sistema. El modelo matemático es no lineal entero mixto.

En este artículo se presenta un modelamiento general del problema de la expansión de sistemas de distribución secundarios, el cual incluye los diferentes costos fijos y variables que han sido tratados dentro de la literatura especializada de manera independiente. Cabe resaltar que dentro de la literatura no existe un modelo que reúna todos los aspectos considerados en este artículo, pues

involucra algunos términos que han sido tenidos en cuenta por algunos autores y descartados por otros. La motivación de este artículo entonces, consiste en poner a consideración de la comunidad científica un modelo de programación no lineal entero mixto que permita ser adaptado a diferentes circunstancias de acuerdo a criterios del diseñador y ser resuelto usando algún método de optimización.

## 2. FORMULACION DEL PROBLEMA

Si la expansión de los sistemas de distribución secundaria no se realiza en una forma adecuada el sistema puede tener los siguientes problemas:

- Incremento en las pérdidas del sistema.
- Una regulación de voltaje deficiente.
- Sobrecargas en los alimentadores secundarios existentes.
- Sobrecargas en los transformadores de distribución existentes.
- Pérdida de confiabilidad y calidad del suministro de la energía eléctrica.

Con el fin de solucionar los problemas descritos en el párrafo anterior se pueden considerar los siguientes aspectos:

- La reubicación de transformadores de distribución existentes.
- La ubicación y dimensionamiento de nuevos transformadores de distribución.
- El aumento del calibre de los alimentadores secundarios existentes (reconductorización).
- La ubicación y dimensionamiento de nuevos alimentadores secundarios.
- Reconfiguración de la topología de la red.

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta en la solución del problema del planeamiento de estos sistemas es el desbalance de fases, esto debido a la conexión de diferentes cargas (monofásicas y trifásicas) que se conectan a las redes secundarias.

Para evitar los problemas mencionados anteriormente se debe realizar un diseño óptimo de los sistemas de distribución, con el fin de obtener una solución técnicamente factible. La planificación óptima posee, como principal propósito, determinar la configuración óptima de la red, qué inversiones deben realizarse y el momento de la construcción de las distintas partes de la red, con el fin de alcanzar costos globales mínimos asociados a dicho sistema, cumpliendo siempre un conjunto de restricciones técnicas.

## 3. MODELAMIENTO MATEMATICO DEL PROBLEMA

En el problema que se pretende resolver se conocen algunos elementos existentes como transformadores de distribución y alimentadores secundarios. Cada nodo tiene asociada una determinada demanda de potencia y cada fuente tiene un límite máximo de la potencia de suministro. Se conocen, además, varias posibles rutas para la construcción de líneas eléctricas con el fin de transportar la potencia desde los transformadores de distribución hasta las cargas. Cada una de las líneas posee un costo que depende principalmente de su longitud (costos fijos) y del valor de potencia que transporta (costos variables). Dentro de las restricciones se debe señalar que los conductores que pueden utilizarse para la construcción de las líneas poseen unos límites térmicos en cuanto a la potencia máxima que pueden transportar, y los transformadores poseen también, como se dijo antes, unos límites en la potencia que pueden suministrar.

Además, se deberá satisfacer la primera ley de Kirchhoff en todos los nodos del sistema de distribución de energía eléctrica, así como las restricciones de máximas caídas de tensión en ellos y la restricción de radialidad.

Cada una de las posibles rutas en las que se puede construir una línea eléctrica llevará asociadas, en principio, dos variables continuas representativas del flujo de potencia. En este sentido, se considera que para cada línea existen dos arcos y por lo tanto, dos variables continuas. Suponiendo que existe una línea entre los nodos 1 y 2, habrá entonces entre estos nodos dos arcos (flujos de potencia) en sentido contrario, los flujos  $f_{1-2}$  y  $f_{2-1}$ . En el proceso de optimización se obtendrán los valores óptimos de dichas variables. Por lo tanto se determinarán los valores de los flujos óptimos de potencia en la red de distribución.

Al colocar dos arcos, y por lo tanto tener en cuenta dos variables continuas para cada línea, si una de estas variables no es nula, es necesario que la otra si lo sea ya que en otro caso no se alcanzaría el costo mínimo en la función objetivo del proceso de optimización. Se puede observar que el aumentar la cantidad de potencia que circula por una línea eléctrica influye en la función objetivo incrementando su valor. Transportar dos valores de potencia (en dos sentidos opuestos) en una línea, podría parecer inicialmente un resultado matemático posible (ya que ello forma parte de la formulación

matemática), pero el proceso de optimización siempre forzará a alcanzar un valor nulo de, al menos, uno de los dos posibles flujos de potencia en cada una de las líneas eléctricas (líneas existentes en el sistema de distribución inicial y líneas futuras propuestas para construir en la ampliación de dicho sistema de distribución), esto con el fin de garantizar la radialidad del sistema.

En los trabajos de investigación realizados se ha considerado que las variables continuas citadas representan potencias aparentes, pero podrían también representar corrientes. En cualquier caso, afectan directamente los costos variables de las líneas asociados a las pérdidas de energía por efecto Joule.

Además de las variables continuas asociadas a los flujos de potencia, existen unas variables binarias asociadas a la utilización, o no, de las posibles rutas que inicialmente se han propuesto para la instalación de líneas eléctricas. Cada posible tamaño de conductor propuesto para la construcción de líneas poseerá una variable binaria asociada, que adoptará el valor cero si no se utiliza para la construcción de una línea eléctrica con ese tamaño de conductor y un valor de uno si se construye utilizándolo. Por ejemplo, el alimentador que une los nodos 1 y 2 tendrá asignada una variable binaria que puede denotarse como  $(X_{1-2})_2$ , la cual está asociada a la utilización del alimentador que une los nodos 1 y 2, haciendo uso del tamaño de conductor 2. Si el valor de todas las variables binarias asociadas a una ruta es nulo, entonces los flujos de potencia asociados deberán ser nulos. Una vez se determina el tamaño del conductor que se va a utilizar para la construcción de una determinada línea eléctrica, haciendo uso de una de las rutas propuestas, los flujos existentes en los arcos asociados a dichas rutas pueden denotarse por medio de  $f_{1-2}$  y  $f_{2-1}$ , indicando de esta forma que son flujos que circulan por una línea construida. Las variables binarias intervienen directamente en los costos fijos asociados a las líneas eléctricas que formarán parte de la función objetivo junto a los costos variables señalados anteriormente.

En cuanto a los transformadores de distribución, en el diseño óptimo se incluyen aspectos similares a los ya indicados para las líneas eléctricas: variables binarias para determinar su localización y variables continuas para determinar los flujos de potencia que suministran las subestaciones, costos asociados a las subestaciones y límites máximos de capacidad de potencia.

El problema del planeamiento de sistemas secundarios de distribución debe ser modelado con el mismo grado de precisión que los problemas de operación en estos

misimos sistemas. Con el fin de lograr esto se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las cargas son representadas como un modelo de corriente constante, lo que significa que las cargas no varían con los voltajes nodales.
- Con el fin de facilitar el modelamiento matemático y la solución del problema del planeamiento, pueden ser usados los centros de demanda. Estos representan un grupo de usuarios los cuales para propósitos eléctricos y de cálculos son considerados como un único nodo.
- Los costos de inversión y de operación y las diferentes posibilidades de localización de los alimentadores secundarios y transformadores de distribución propuestos son conocidos de antemano.

### 3.1. Variables empleadas en el modelo

- $z$ : función objetivo.
- $k$ : tipo o calibre del conductor.
- $RD_{MAX}$ : máximo recurso disponible para invertir en el proyecto.
- $M$ : tipo de transformador de acuerdo a su capacidad.
- $CREC_{ij,k}$ : costo de inversión de reconductorizar en la ruta  $ij$ , conductor tipo  $k$ .
- $CF_{ij,k}$ : costo de inversión de un alimentador secundario entre los nodos  $i-j$ , conductor tipo  $k$ .
- $CF_{i,M}$ : costo de inversión de un transformador de distribución en el nodo  $i$ , tipo  $M$ .
- $CFB_i$ : costo fijo del balance de cargas.
- $CT_{i,M}$ : costo fijo de reubicar un transformador existente tipo  $M$ .
- $C_{kwh}$ : costo de la energía expresada en  $[\$/kW-h]$ .
- $T$ : período de planeamiento en horas.
- $R_{ij,k-abc}$ : resistencia del conductor tipo  $k$  entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $X_{ij,k-abc}$ : reactancia del conductor tipo  $k$  entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $I_{ij-abc}$ : corriente entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $I_{ji-abc}$ : corriente entre los nodos  $j-i$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $I_{ij-abc}^{max}$ : corriente máxima permitida entre los nodos  $i-j$ , para las fases  $a-b-c$ .
- $V_{i-abc}$ : caída de voltaje en el nodo  $i$  para las fases  $a-b-c$ .
- $V_{j-abc}$ : caída de voltaje en el nodo  $j$  para las fases  $a-b-c$ .
- $V_{i-abc}^{max}$ : máximo voltaje permitido en todos los nodos del sistema, para las fases  $a-b-c$ .

- $V_{i-abc}^{\min}$ : mínimo voltaje permitido en todos los nodos del sistema, para las fases a-b-c.
- $O_{AN}$ : conjunto de alimentadores nuevos del sistema.
- $O_{AE}$ : conjunto de alimentadores existentes del sistema.
- $O_A: O_{AN} \cup O_{AE}$
- $O_{TN}$ : conjunto de transformadores nuevos del sistema.
- $O_{TE}$ : conjunto de transformadores existentes del sistema.
- $O_T: O_{TN} \cup O_{TE}$
- $O_R$ : conjunto de tramos del sistema a reconductorizar.
- $O_B$ : conjunto de puntos que representan las posiciones de las cargas en las fases.
- $n$ : número total de nodos.
- $n_{fex}$ : número de alimentadores existentes.
- $n_{tex}$ : número de transformadores existentes.
- $d_{ij,k}$ : variable de decisión binaria para la instalación de un conductor tipo k, ruta ij.
- $d_{i,M}$ : variable de decisión binaria para la instalación de un transformador tipo M, nodo i.
- $dREC_{ij,k}$ : variable de decisión binaria para reconductorizar en la ruta ij, conductor tipo k.
- $dCT_{i,M}$ : variable de decisión binaria para reubicar transformadores existentes, tipo M.
- $d_i$ : variable de decisión binaria para realizar balanceo de cargas.
- $P_{i-abc}^{\text{in}}$ : potencia activa inyectada al nodo i.
- $Q_{i-abc}^{\text{in}}$ : potencia reactiva inyectada al nodo i.
- $P_{i-abc}^c$ : potencia activa consumida en el nodo i.
- $Q_{i-abc}^c$ : potencia reactiva consumida en el nodo i.
- $G_{ij,k-abc}$ : conductancia del conductor tipo k en la ruta ij, para las fases a-b-c.
- $B_{ij,k-abc}$ : susceptancia del conductor tipo k en la ruta ij, para las fases a-b-c.
- $P_{i-abc}^T$ : potencia activa nominal del transformador en el nodo i.
- $Q_{i-abc}^T$ : potencia reactiva nominal del transformador en el nodo i.

### 3.2. Formulación de la Función Objetivo

La función objetivo tiene en cuenta el menor costo fijo (costos de inversión) y costo variable (costos de operación) envueltos en la expansión y la operación del sistema durante el período de planeamiento. El plan óptimo de expansión corresponde a la configuración topológica del sistema que satisface los criterios técnicos a un mínimo costo. Una vez conocidos estos costos, la función objetivo a ser minimizada puede ser escrita como se ilustra en la ecuación 1.

$$Z = \left[ \begin{aligned} & \sum_{ij \in O_{AN}} (d_{ij,k} * C F_{ij,k}) + \sum_{i \in O_{TN}} (d_{i,M} * C F_{i,M}) \\ & + \sum_{ij \in O_{AE}} \sum_{k \in O_R} (dREC_{ij,k} * C REC_{ij,k}) + \\ & \sum_{ij \in O_{AN}} \left[ C_{kwh} * T * R_{ij,k-abc} * |I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2 \right] \\ & + \sum_{i \in O_{TE}} dCT_{i,M} * C T_{i,M} + \sum_{i \in O_B} d_i * C FB_i + \\ & \sum_{ij \in O_{AE}} \left[ C_{kwh} * T * R_{ij,k-abc} * |I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2 \right] \end{aligned} \right] \quad (1)$$

En esta ecuación los dos primeros términos tienen en cuenta el costo fijo de la instalación de nuevos alimentadores secundarios y transformadores de distribución, respectivamente. El tercer término corresponde al valor de reconductorizar un alimentador secundario existente. La cuarta expresión representa los costos operativos de alimentadores existentes. El siguiente término involucra el valor de reubicar transformadores de distribución existentes. Las últimas dos expresiones tienen en cuenta el costo del balanceo de fases y los costos operativos de alimentadores existentes, respectivamente.

### 3.3. Formulación de las Restricciones

**Balance de Demanda:** se basa en la aplicación de las Leyes de Kirchhoff a cada nodo del sistema. Estas restricciones aseguran para cada nodo que la sumatoria de flujo de potencia sea nula. Todos los nodos, incluidos los transformadores, son involucrados en las ecuaciones. Los flujos en los transformadores deben ser considerados para las restricciones de balance de demanda.

$$\begin{aligned} P_{i-abc}^{\text{in}} - P_{i-abc}^c - V_{i-abc} \sum_{j \in n} V_{j-abc} \left[ (G_{ij,k-abc} * \cos \theta_{ij-abc}) - (B_{ij,k-abc} * \sin \theta_{ij-abc}) \right] &= 0 \\ Q_{i-abc}^{\text{in}} - Q_{i-abc}^c - V_{i-abc} \sum_{j \in n} V_{j-abc} \left[ (G_{ij,k-abc} * \sin \theta_{ij-abc}) - (B_{ij,k-abc} * \cos \theta_{ij-abc}) \right] &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

**Máximo flujo de potencia:** asegura que la capacidad máxima de los alimentadores y transformadores no se exceda durante el período de planeamiento. La primera ecuación involucra los límites máximos para los alimentadores. Los otros dos términos corresponden a la capacidad máxima de potencia activa y reactiva de los transformadores.

$$\begin{aligned} |I_{ij-abc} + I_{ji-abc}| &\leq I_{ij-abc}^{\max} \\ \sum_{i \in n} P_{i-abc}^c + \sum_{ij \in OA} (R_{ij,k-abc}) * (|I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2) &\leq \sum_{i \in OTE} P_{i-abc}^T \\ \sum_{i \in n} Q_{i-abc}^c + \sum_{ij \in OA} (X_{ij,k-abc}) * (|I_{ij-abc} + I_{ji-abc}|^2) &\leq \sum_{i \in OTE} Q_{i-abc}^T \end{aligned} \quad (3)$$



*Radialidad:* con esta ecuación se garantiza que solamente existan topologías radiales para la configuración de la red, permitiendo que todos los nodos de carga y los transformadores no queden en subsistemas aislados en la solución final.

$$n_{\text{tex}} + \sum_{ij \in O_{AN}} d_{ij,k} \leq n - n_{\text{tex}} - \sum_{i \in O_{TN}} d_{i,M} \quad (4)$$

*Caídas de tensión permitidas:* la caída de tensión de todos los nodos es calculada entre el transformador y cada uno de los nodos.

$$V_{i-abc}^{\min} \leq V_{i-abc} \leq V_{i-abc}^{\max} \quad (5)$$

*Máxima Inversión permitida:* se debe garantizar que el valor de la función objetivo no supere el valor de los recursos máximos disponibles para el proyecto.

$$z \leq RD_{\text{MAX}} \quad (6)$$

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se propuso un modelo matemático general para el problema del planeamiento de redes secundarias. Se tuvieron en cuenta la topología de la red, el tipo de conductor, costos de reconductorización, balanceo de fases y pérdidas técnicas. También se incluyeron los costos de localización y dimensionamiento de transformadores de distribución. Las restricciones incluyen balance de potencia nodal, límites de capacidad de potencia de los alimentadores y transformadores, caídas de tensión admisibles en los nodos del sistema y la inversión máxima disponible.

El modelo matemático propuesto es del tipo no lineal entero mixto. Este problema debido a su complejidad matemática es considerado como NP completo. Dicho lo anterior, las técnicas metaheurísticas de optimización proporcionan diferentes alternativas de solución que han obtenido buenos resultados y han mostrado ser eficientes en las diferentes implementaciones de este tipo.

Este problema puede ser resuelto de forma completa o simplificada, esto de acuerdo a las necesidades del ingeniero encargado de la planeación del sistema. Es claro que en todos los casos no se tienen los mismos requisitos e intereses, por tanto, es preciso anotar que el modelo puede ser ajustado a los requerimientos que cada quien considere más relevantes.

Una de las mayores dificultades en la solución de un modelo matemático es que éste involucre variables

enteras. Existen diferentes maneras de tratar esta dificultad. Una de ellas consiste en descomponer el problema en dos partes: la de inversión y la de operación. La primera parte debe ser resuelta aplicando técnicas enteras, lo cual arrojará unas soluciones que son los datos de entrada del problema operativo, el cual en este caso es un problema no lineal. Otra alternativa se fundamenta en que para problemas de alta complejidad, es conveniente que en la inicialización del proceso de solución se relajen las restricciones asociadas a este tipo de variables y permitan que sean trabajadas como variables continuas, toda vez que esto facilita que la técnica parta de puntos de buena calidad.

Es conocido que para este tipo de problemas donde intervienen varios objetivos, la aplicación de técnicas multiobjetivo arrojan resultados más satisfactorios, siempre teniendo la precaución de no involucrar más de tres objetivos al mismo tiempo. Otra de las ventajas de implementar este tipo de técnicas radica en el hecho puntual que éstas no arrojan una solución, sino un conjunto de alternativas igualmente atractivas desde el punto de vista de los objetivos que intervienen en el proceso, lo cual facilita la toma de decisión fundamentada en los propios intereses de la empresa de distribución.

#### REFERENCIAS

- Bazán, F. A., Mantovani, J. R., Romero, R. A. (2002). *Planeamiento de Expansión de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando un Algoritmo de Búsqueda Tabú*, Presentado en: XIV Congreso Brasileiro de Automatización, Natal, Brasil.
- Ramírez R., Adams, I. J., Gönen, R. N. (1994). *Computer Aided Design of Power Distribution Systems: Multiobjective Mathematical Simulations*, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 9-12.
- Granada M., Gallego R., Hincapié, R. (2005). *Planeamiento de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando Branch And Bound*, Revista Ingeniería, Universidad Distrital, Vol. 10, No. 2, pp. 44-50.
- Almeida, M. S., Mantovani, J. R., Romero, R. A. (2002). *Colocación Óptima de Subestaciones y Alimentadores en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Usando un Algoritmo de Branch and Bound*, Presentado en: XIV Congreso Brasileiro de Automatización, Natal, Brasil.



- Yoshimoto, E. (2003). *Planejamento de Redes Secundárias de Distribuição de Energia Elétrica*, Tesis de Maestría, UNICAMP, Brasil.
- Cossi, A. M., Romero, R., Mantovani, J. R. (2005). *Planning of Secondary Distribution Circuits Through Evolutionary Algorithms*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1.
- Souza, C. H. (2006). *Planejamento e Projeto de Circuitos Secundários de Distribuição de Energia Elétrica por meio de Algoritmo Busca Tabu*, Tesis de Maestría, UNESP, Brasil.
- Marroquín, O. A. (2008). *Planeamiento de Redes Secundarias de Distribución Usando un Algoritmo de Optimización Basado en Colonia de Hormigas*, Tesis de Pregrado, Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Recibido: 14 de septiembre de 2008  
Aceptado: 19 de febrero de 2009**PROPOSAL TO USE ADAPTIVE CONTROL IN WATER CHILLERS FOR USE  
IN VAPOR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEMS****PROPUESTA DE USO DE CONTROL ADAPTATIVO EN ENFRIADORES DE  
AGUA PARA USAR EN SISTEMAS DE REFRIGERACION POR  
COMPRESION DE VAPOR****PhD. Francisco Ernesto Moreno Garcia, PhD. Enio Pedone Bandarra Filho  
PhD. Oscar Saul Hernandez Mendoza****Universidade Federal de Uberlândia.**Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos, LEST, Faculdade de Engenharia Mecânica,  
Av. João Naves de Ávila, 2160, Santa Mônica, Bloco 1M, Uberlândia, MG, Brasil.  
E-mails: {femgarcia, bandarra.br, oscarhm}@mecanica.ufu.br

**Abstract:** The present work evaluates a self-contained air condition refrigeration unit (5 TR; 17.5 kW). In order to realize the experimental evaluation and analysis, evaporator is operated with water instead of humid air, as secondary fluid. Normally the self contained refrigeration unit uses “on-off” control and a fixed compressor rotation. This paper evaluates the possibility of using adaptative control, instead of on-off control, actuating on a Variable Speed Drive that operate the compressor, several experimental analysis were made, looking forward the selection of the best control strategy, with system operating in partial charge mostly; paper shows results obtained and future works to be realized.

**Resumen:** El presente trabajo evalúa unidad de aire de refrigeración autónoma (5 TR; 17,5 kW). El evaporador es operado con agua en lugar de aire húmedo, como fluido secundario con el fin de realizar la evaluación y análisis experimental. Normalmente, la unidad de refrigeración autónoma utiliza un control “on-off” y una rotación fija de compresores. También se evalúa la posibilidad de utilizar el control adaptativo, en lugar de control “on-off”, con el accionamiento de un variador de frecuencia que opera el compresor, fueron realizados una serie de análisis experimentales, atendiendo a la selección de la mejor estrategia de control, con el sistema operativo en carga parcial en su mayoría; el trabajo muestra los resultados obtenidos y los trabajos futuros a realizar.

**Keywords:** Control process, Fuzzy adaptive, Refrigeration system, Variable Speed Drive.

**1. INTRODUCCION**

En la ultima década, se han destacado las técnicas de control inteligente fuzzy o neural para controlar sistemas, fuertemente desarrolladas en aplicaciones de investigación e industria (Borja, T. J. A. 2006). La motivación de nuestro proyecto es proporcionar una alternativa al modelamiento y diseño de

sistemas de control para modelos dinámicos tradicionales. Un principal elemento del objetivo de este trabajo es aplicar la teoría adaptativa a plantas desconocidas, por sintonización parametrizadas heurísticamente. Primeramente, el control fuzzy como base describe a través de reglas (*if – then.*) una orientación humana para obtener un aprendizaje afianzado de los sistemas a partir de la

experiencia del proyector (Da Silva et al. 2001). Esta es la principal característica para desarrollar control a procesos envolviendo reglas lógicas reales. Sin embargo, investigadores cuestionan los sistemas que presentan modificaciones dinámicas, donde claramente es considerado prioridad la estabilidad del sistema. Un gran número de investigaciones por ejemplo (Ferreira A. et al. 1999) se han enfocado en tratar aquellas modificaciones en los procesos. Estas investigaciones generaron en los últimos tiempos justificación para el uso de los controladores fuzzy adaptativos. Son controladores que revelan alguna capacidad de modificar su comportamiento en respuesta a cambios dinámicos del proceso o perturbaciones. Paralelamente, la instrumentación va de la mano con el control como herramienta para automatizar y optimizar sistemas de aire acondicionado y de refrigeración. Permitiendo que el usuario pase a tener condiciones de controlar la operación a partir de una central, utilizando hardware y software apropiados. (Silva Roberto M, 2004). Este trabajo presenta la construcción, instrumentación, y desarrollo de un control fuzzy adaptativo aplicado a una banco experimental de pruebas de un sistema de refrigeración; integrando los principios de proyecto térmico, proyecto electrónico, programación y técnicas de control con la finalidad de aumentar el rendimiento (COP) del sistema para mantener apropiadamente las condiciones normales de operación en función de las principales variables del proceso.

## 2 CONCEPTOS BASICOS

El ciclo de refrigeración por compresión puede ser estudiado de acuerdo con las características termodinámicas de sus equipos y generalmente, es denominado ciclo saturado simple. Por intermedio de este podemos acompañar el desempeño y control del proceso. El ciclo usado puede ser visto según la figura 1.

Iniciando con el refrigerante que es comprimido en el compresor en estado de vapor, a una presión y temperatura alta, sigue directamente para el condensador. En este el calor ganado en el proceso de compresión es rechazado para un medio exterior, ocasionando así un cambio de fase vapor para líquido. Al dejar el condensador, el fluido refrigerante sigue para el dispositivo de expansión. Este dispositivo provoca una caída de presión, responsable también por la caída de temperatura. En seguida el refrigerante, entra en el evaporador, donde recibe calor del medio circundante,

cambiando de fase hasta su completa evaporación. En la secuencia, el fluido, en fase vapor, sigue para el compresor, iniciando nuevamente otro ciclo. (Wylen G. J; Borgnakke C., 2003).

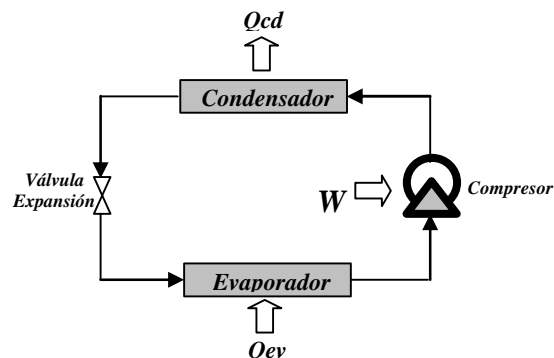


Fig 1. Ciclo de refrigeración por compresión

## 3. BANCO EXPERIMENTAL

El diseño de nuestro banco experimental como se muestra en la fig. 2, está compuesto primordialmente por un compresor semi-hermético, válvula de expansión termostática, intercambiadores de calor condensador y evaporador de tubos concéntricos. El fluido secundario, agua, para alimentación del condensador circula por una torre de resfriamiento. Por otro lado, la alimentación del evaporador es realizada desde un tanque de almacenamiento térmico con una resistencia eléctrica de 15 kW que tiene como función mantener una temperatura estable deseada del agua en la entrada del evaporador, esta resistencia es comandada por un controlador lógico programable (PLC). Un variador de frecuencia tiene como función controlar la rotación del compresor de acuerdo a la lógica de control deseada para el sistema.

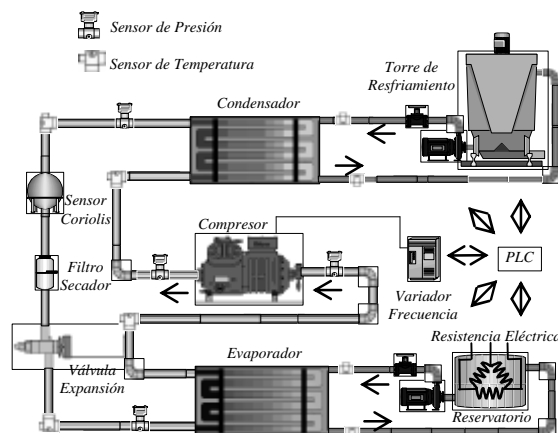


Fig 2. Representación esquemática del banco experimental

Un medidor de flujo másico tipo Coriolis fue utilizado para evaluar el flujo de masa del refrigerante R-22 del circuito principal. Las Temperaturas, presiones, flujo másico, son adquiridas a través del PLC y gerenciados a través desde un software implementado en Labview®. Una Imagen de nuestro banco experimental es mostrado en la figura 3.

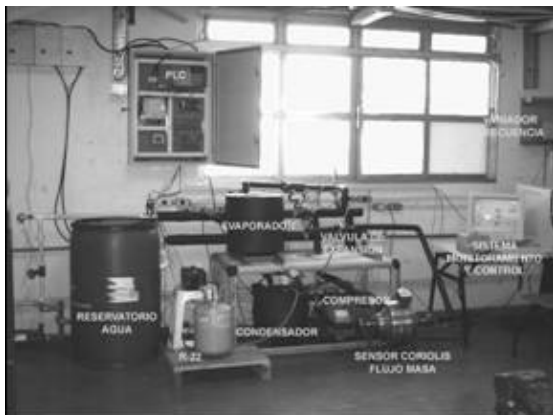


Fig 3. Banco Experimental con aislante térmico

Los sensores de temperatura aplicados para el banco experimental fueron los dispositivos RTD de 3 hilos modelo PT100 con operación entre los  $-30^{\circ}\text{C}$  hasta  $100^{\circ}\text{C}$ . Fueron utilizados transductores de presión tipo piezo-resistivo (PA3023) con operacionalidad desde 0 hasta 35 MPa. Los módulos de condicionadores de señales fueron proyectados en el Laboratorio de energía e sistemas térmicos, LEST, para fornecer un formato adecuado a las señales para ser captadas por el PLC.

En el caso del acondicionamiento de las señales de los sensores de presión se utilizó el circuito integrado INA111 como amplificador de instrumentación de entrada tipo FET de excelente rendimiento. Para las señales de temperaturas su acondicionamiento fue proyectado a través del circuito instrumentación INA125.

#### 4. CONTROLADOR FUZZY ADAPTATIVO

Muchos de los procesos del mundo real que requieren control automático son de naturaleza no lineal, con parámetros dependientes de las condiciones de operación (Cardenas N. Israel, 2002). La necesidad de identificar estos cambios y de adaptarse a nuevas condiciones adiciona a los controladores fuzzy adaptativos dos componentes extras, que no están presentes en los controladores

fuzzy convencionales. El primer componente es el “monitor de procesos” que detecta los cambios en las características del proceso. Este monitoramiento puede ser hecho de dos maneras: midiendo el desempeño del sistema sobre el control o estimando continuamente algunos parámetros del modelo del proceso.

El segundo componente responsable es el “mecanismo de adaptación”. Este mecanismo puede modificar los parámetros del controlador, para mejorar el desempeño con base en las salidas del monitor de proceso. La figura 4 muestra el esquema general de un controlador fuzzy adaptativo tipo con sus componentes.

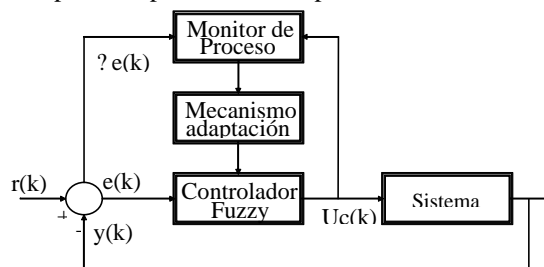


Fig 4. Controlador Fuzzy Adaptativo

Para realizar el control del sistema con base en la información anteriormente presentada, fue usado, inicialmente, un controlador *fuzzy* principal (convencional) y en seguida fue implementado un mecanismo *fuzzy* de adaptación de ganancia. El diagrama de bloques del controlador *fuzzy* principal (convencional) es mostrado en la figura 5.

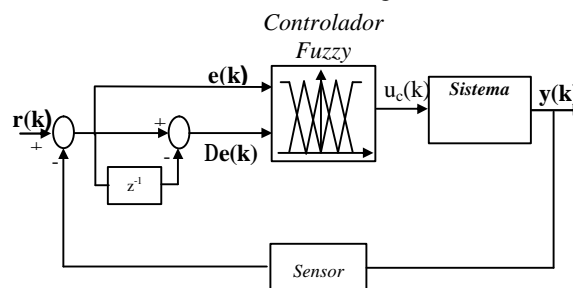


Fig 5. Controlador Fuzzy convencional

Fueron definidos para cada una de las entradas del controlador fuzzy principal tres funciones de pertinencia [(N)egativo, (Z)ero e (P)ositivo] del tipo triangular e igualmente espaciadas y definidas dentro de un universo del discurso sintonizados de forma heurística, conforme en la fig. 6.

La salida del controlador fuzzy es de tipo sugeno de orden cero, con valores “crisp” (N=-1.0, Z=0 y P=1.0) constantes. El mecanismo de inferencia utilizado fue el max-prod.

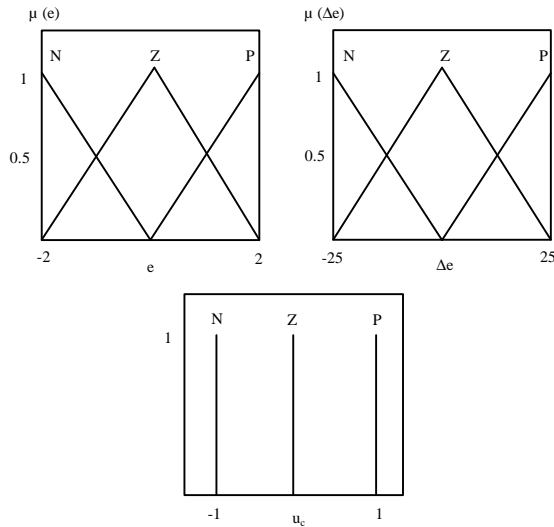


Fig 6. Funciones de pertinencia fuzzy de las variables de entrada y salida del controlador

La definición de las variables de entrada del controlador fuzzy es evaluada a partir de la señal de error y de la variación del error, así, definidas por las siguientes ecuaciones:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

Donde  $k$  y  $\Delta t$  se refieren al instante  $e$  al intervalo de tiempo utilizados,  $y(k)$  es la lectura del sensor de temperatura.

Una vez proyectado el controlador principal, el segundo paso es la adición del mecanismo de adaptación. Para eso, el universo del discurso del controlador principal fue normalizado en un intervalo de -1 a 1, y acoplado al controlador fuzzy principal. El mecanismo fuzzy de adaptación de la ganancia conforme se muestra en la figura 7.

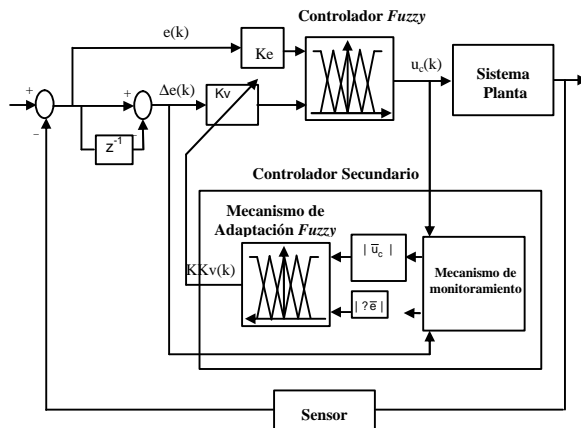


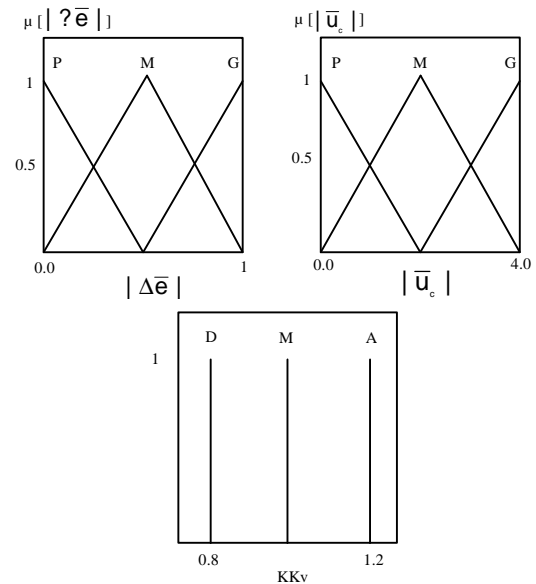
Fig 7. Controlador fuzzy adaptativo.

Cabe destacar que el sistema es monitoreado a partir de la medida absoluta de derivada del error  $|\Delta \bar{e}|$  y la medida absoluta de la salida del control  $|\bar{u}_c|$  observando los tres últimos tiempos de muestreo. Estos valores se calculan de la siguiente forma:

$$|\Delta \bar{e}| = \frac{|\Delta e(k)| + |\Delta e(k-2)| + |\Delta e(k-3)|}{3} \quad (3)$$

$$|\bar{u}_c| = \frac{|u_c(k)| + |u_c(k-2)| + |u_c(k-3)|}{3} \quad (4)$$

De forma similar al controlador fuzzy, fueron definidos para cada una de las entradas del mecanismo fuzzy adaptación, tres funciones de pertinencia [(P-pequeño, (M-médio e (G-grande)] de tipo triangular, definidas dentro del universo de discurso de las variables de entrada y sintonizadas de forma heurística, como lo ilustra la figura 8. el mecanismo de inferencia fue *max-prod* y de salida



de tipo Sugeno de orden cero.

Fig 8. Funciones de pertinencia e intervalos fuzzy de las variables de entrada del mecanismo de adaptación.

#### 4.1 Avaluación del Sistema en malla Cerrada.

Para la realización de los ensayos, con el objetivo de evaluar el desempeño del controlador lógico difuso adaptativo, el sistema es operado inicialmente en malla abierta (sin control) trabajando en régimen permanente con condiciones impuestas al banco experimental, como temperatura del agua en la entrada del evaporador (T8) a 22 °C, temperatura del agua en la salida del

evaporador (T5) a 14,6 °C y a frecuencia de 50 Hz. En el momento en que el controlador es activado, este observa condiciones iniciales de altos errores y pequeña acción de controle, por tanto el controlador difuso se adapta por medio de su factor de escala Kv ajustado por la salida KKv en el mecanismo interno de adaptación.

Con el transcurrir de tiempo, el valor de Kv elevado, el controlador queda más sensible al  $\Delta$ error, consecuentemente, un número mayor de reglas del controlador principal es utilizado, lo que mejora el desempeño del controlador. El valor inicial de Kv influencia, por tanto, el número de reglas envueltas en el controlador principal al iniciarse el proceso de control y la velocidad con que otras reglas son alcanzadas. Así el valor Kv asumido inicialmente afecta el tiempo de acomodación del sistema controlado. Como puede ser observado en la figura 9, el momento en que el controlador, con su máxima sensibilidad adaptada actúa en el sistema aumentando la frecuencia del compresor, ósea, un incremento inmediato en las presiones de alta, teniendo como objetivo llevar la temperatura del agua en la salida del evaporador (T5) hacia una temperatura previamente estipulada (*setpoint*) establecida en el controlador. En estas condiciones, se registro un tiempo transitorio de 25 segundos y tiempos de acomodación de 55 segundos.

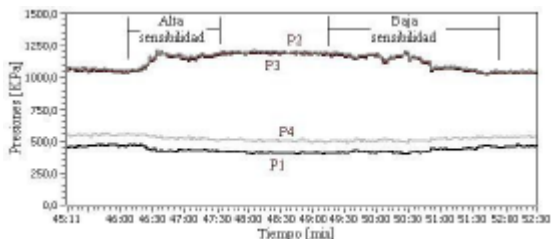


Fig 9. Comportamiento de las presiones del sistema con control lógico difuso Adaptativo.

Cuando el sistema converge, se tiene una situación de bajas señales de entrada y bajas señales de control y un valor de Kv prácticamente constante ( $KKv=1$ ). El controlador, una vez detectado una condición de equilibrio del proceso (caracterizado por  $KKv$  próximo de la unidad durante un cierto tiempo), disminuye el valor del factor de escala, así, su sensibilidad queda robusta. Por tanto, un bajo valor de Kv implica un tiempo mayor de régimen transitorio.

Estos resultados estimularon más experimentos realizados sobre condiciones impuestas a nuestro banco experimental.

El comportamiento del controlador lógico difuso adaptativo puede ser observado en la figura 10. Para los 2 primeros minutos y 50 segundos el controlador mantiene la temperatura del agua en la entrada del evaporador (T5) referenciada a un *setpoint* (Sp), en este periodo el controlador detecta condiciones de equilibrio del proceso, generando bajas señales de salida (Uc) que gradúan levemente la frecuencia adecuada del compresor, como puede ser observada en la figura 10b. Ese efecto con el controlador robusto presenta suaves tiempos transitorios en la evaluación de las presiones del sistema, ver figura 11.

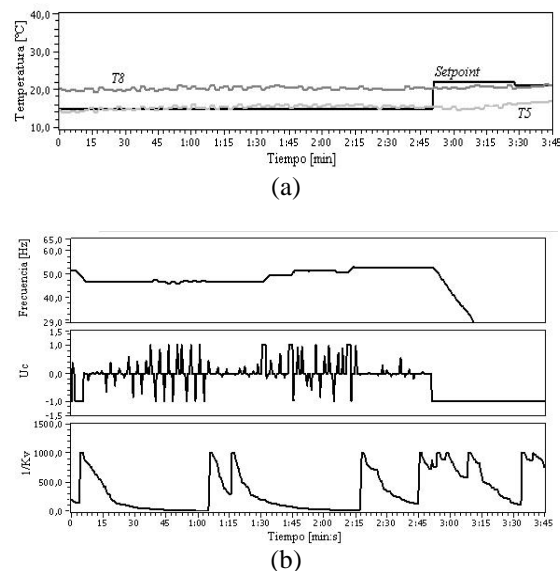


Fig 10. Efectos del controlador lógico difuso adaptativo en el sistema. (a) evolución de las Temperaturas de control e de referencia en el evaporador. (b) Sensibilidad ( $1/Kv$ ), señal de salida (Uc) del controlador.

Después de los 2 minutos y 50 segundos, cuando en el sistema sufre una alteración significativa, por ejemplo, alteración en el *setpoint* (Sp) mostrada en la misma figura 10a, el controlador observando la condición inicial de elevados errores y de pequeño control, actúa de forma a aumentar su sensibilidad a través de su factor de mecanismo interno de adaptación. En las figuras 10b y 11 puede ser observado el momento en que el controlador con su máxima sensibilidad adaptada actúa en el sistema disminuyendo inmediatamente la frecuencia del compresor, o sea, un decremento inmediato en las presiones de alta, con objetivo de llevar la temperatura del agua en la salida del evaporador (T5) a una nueva temperatura de *setpoint* establecida en el controlador.



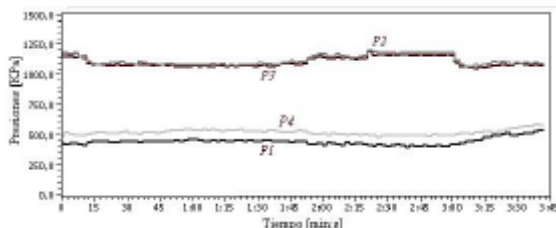


Fig 11. Evolución de las presiones del sistema con el controlador lógico difuso adaptativo.

## 5. CONCLUSIONES

Se implementada una estructura adecuada para el ciclo por compresión de vapor, controlando la velocidad de rotación del compresor en un banco de prueba experimental, que fue proyectado, construido e instrumentado. En el proyecto y montaje de los acondicionadores de señal fue llevado en consideración la implementación de amplificadores operacionales de instrumentación (INA125 e INA111), que presentaron un comportamiento lineal con la variable medida.

Pruebas experimentales realizadas adicionalmente con diferentes estrategias de control aplicadas a este tipo de sistema, se determinó una economía de energía y mejoramiento en el rendimiento (COP) del sistema representado por una baja demanda de potencia menores de 2.40 kW, obtenidos por parte del control adaptativo con un conjunto de reglas fuzzy que permitieron tratar de forma adecuada las variaciones de la carga térmica del ambiente en el transcurso de un día. Por otro lado, estrategias comunes encontradas en el mercado como el controlador *on-off*, no consiguió mantener el sistema estable. Su comportamiento represento oscilaciones en la variable condicionada, representando mayor deficiencia y comprometiendo el compresor al ser trabajado en modo directo *on - off* con demandas de potencia mayores a 2.90 kW. Evidentemente, el aporte al trabajar técnicas adaptativas, en este caso aplicado a la velocidad del compresor, permitió que el sistema de refrigeración por compresión a vapor, opere más estable y representa al consumidor economías de energía en el orden de los 17.2% bajo las condiciones de trabajo experimentadas.

Una proyección educacional e industrial hacia un futuro de este trabajo, coloca a disposición el aprendizaje y entrenamiento de las diferentes estrategias de control inteligentes multivariables actuando en válvulas de expansión y compresores semi-herméticos simultáneamente cuando más de una variable se desea controlar.

## 6. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas ACP Termotécnica, por la donación de los intercambiadores de calor y BITZER internacional Compresores por el compresor del sistema. A la FEMEC, Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Uberlândia y al CNPq (Consejo nacional de desarrollo científico y tecnológico BRASIL) por el apoyo financiero.

## REFERENCIAS

- Allan Bradley, (1994). "Instruction set reference PLC-5 programming software", Allan Bradley Company Inc, Cat. 6200-6.4.11
- Borja, T. J. A. (2006). *Automatización y control inteligente on-line de sistemas de refrigeración utilizando redes neurales artificiales*. 124 pp. Teses de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Burn-Brown, (2005). DataSheet "Instrumentation amplifier precision INA125", Texas Instruments Incorporated, pág 10.
- Burn-Brown, (2005). DataSheet "High speed FET-Input instrumentation amplifier precision INA111", Texas Instruments Incorporated, 7p.
- Cardenas N. Israel, (2002). *Uso de Controladores Fuzzy Adaptativos implementados em microcontroladores, en el controle de vibraciones de sistemas mecanicos*. 250 pp. Teses Mestrado en Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia.
- Da Silva F.V, Junior V.S. (2001). "Controle fuzzy da temperatura de condensação de um sistema de resfriamento chiller". XVI Congresso Brasileiro de engenharia mecânica COBEM 2001/ABCM, Vol. 5, p189-195.
- Ferreira A, Fuentes R. 1999. "Estudio comparativo entre control pid y difuso". SOMI XIII-Congreso de Instrumentación, Ensenada, Mex.
- Garstang, S. W, 1990. "Variable frequency speed control of refrigeration compressors". International Congress of Refrigeration, Australia.
- Luigi, R. B., 2006. Automação de processos industriais e produtivos. Revista Climatização & Refrigeração, No. 72, pág 45-50.
- Silva Roberto M. (2004). "Revista da Associação Brasileira de Refrigeração e Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento, ABRAVA", No. Revista 213, p26.
- Wylen G. J; Borgnakke C. (2003). *Fundamentos da Termodinâmica*. Editorial Edgard Blucher Ltda. São Paulo, Brasil.

**QUANTIFICATION OF CARDIAC FUNCTION  
FROM ANGIOGRAPHIC IMAGES****CUANTIFICACION DE LA FUNCION CARDIACA  
A PARTIR DE IMAGENES ANGIOGRAFICAS****MSc. Hernando Velandia\*, PhD. Rubén Medina Molina\*\***

\* Postgrado de Ingeniería Biomédica, **Universidad de los Andes**, Facultad de Ingeniería, Mérida 5101, Venezuela, E-mail: hernandov@ula.ve.

\*\* Grupo de Ingeniería Biomédica (GIBULA), **Universidad de los Andes**, Facultad de Ingeniería, Mérida 5101, Venezuela. E-mail: rmedina@ula.ve.

**Abstract:** The present work focuses on designing a software platform that allows estimation of parameters related to left ventricular function and coronary arteries. The tool developed and estimated descriptors such as End Diastolic Volume, End Systolic Volume, stroke volume, ejection fraction, ventricular dynamics and quantitative analysis of coronary arteries. For purposes of validation has been done a comparison of our results compared to those achieved by the cardiologist. These results are promising; however, a more complete validation is necessary.

**Resumen:** El presente trabajo se focaliza en el diseño de una plataforma de software que permite la estimación de parámetros relacionados con la función ventricular izquierda y las arterias coronarias. La herramienta desarrollada estima descriptores como el Volumen Diastólico Final, el Volumen Sistólico Final, el Volumen Latido, la Fracción de Eyección, la dinámica ventricular y el análisis cuantitativo de arterias coronarias. Para efectos de validación se ha realizado una comparación de nuestros resultados respecto a los obtenidos por el cardiólogo. Tales resultados son prometedores, sin embargo, una validación más completa es necesaria.

**Keywords:** Software platform, left ventricle, coronary arteries, cardiac function, stenosis.

**1. INTRODUCCION**

La valoración morfológica y funcional del corazón es de vital importancia, debido a que el daño cardiovascular (DCV) es una de las principales causas de mortalidad a nivel mundial (Mackay y Mensah, 2004). De las cuatro cámaras cardiacas, el ventrículo izquierdo (VI) es la más susceptible a sufrir daño severo, en enfermedades tales como la hipertensión arterial, la diabetes mellitus o la arterosclerosis. En la aparición de una disfunción ventricular el VI debe hacer frente a una sobrecarga sanguínea debida a una presión elevada,

por lo que fisiológicamente tiende a sufrir una hipertrofia. Si persiste el estrés el ventrículo acaba por sufrir una disfunción que, con el paso del tiempo, se hace crónica e irreversible. Llegado a este punto, la función del miocardio queda comprometida y la capacidad contráctil del corazón llega a perderse ([www.consumer.es/web/es/salud/problemasdesalud.](http://www.consumer.es/web/es/salud/problemasdesalud/)). Por su parte, las arterias coronarias son las vías encargadas de suministrar la sangre al músculo cardiaco, y cualquier alteración en ellas, puede tener graves consecuencias. A nivel clínico, el análisis a través de imágenes generalmente es realizado de forma visual, lo cual

genera una valoración que resulta imprecisa acerca de la función cardíaca. Con lo expuesto anteriormente el propósito de este artículo es el de presentar una plataforma de software que nos permita obtener los descriptores más significativos para el análisis y prevención de alteraciones en la función cardíaca. El proyecto incluye en un principio el desarrollo de una herramienta semi-automática y posteriormente la automatización del proceso de análisis cuantitativo de la función cardíaca. Para ello se tiene previsto incorporar métodos completamente automáticos para la segmentación del ventrículo izquierdo y las arterias coronarias, como los reportados por los autores (Oost *et al.*, 2006; Bravo *et al.*, 2007). En el presente trabajo se reportan los resultados preliminares correspondientes a la plataforma semi-automática.

## 2. DESCRIPCION DEL SISTEMA

La angiografía por rayos X es una modalidad ampliamente utilizada en la evaluación de la función cardíaca. Para visualizar el corazón con esta modalidad el paciente es sometido a una intervención denominada cateterismo cardíaco, durante la cual, la región a estudiar es llenada con un material de contraste radio-opaco. La adquisición de las imágenes puede ser realizada en dos planos (considerando la vista Oblicua Anterior Derecha (OAD) 30° y la vista Oblicua Anterior Izquierda (OAI) 60°). El tiempo de adquisición promedio es alrededor de 8 a 10s, cubriendo de 7 a 9 ciclos cardíacos. La distribución del contraste inyectado se considera óptima alrededor del segundo o tercer ciclo cardíaco (Yan *et al.*, 1978).

En uno de esos ciclos se seleccionan varios cuadros de imagen relacionados de la siguiente manera: para cuantificar la función ventricular izquierda, se eligen los correspondientes a Diástole y Sístole Final, en los cuales el contorno endocárdico es trazado manualmente por parte del especialista y en función al análisis arterial coronario, una o varias imágenes en las que sea notable la estenosis y el médico pueda ubicar la lesión marcando varios puntos sobre ella. Con base en la información obtenida anteriormente se estiman los volúmenes Diastólico y Sistólico final, la Fracción de Eyección (Oost *et al.*, 2006) y otros parámetros descriptivos de la función ventricular.

Por su parte para el estudio arterial coronario se realiza una segmentación de ésta, basada en las coordenadas seleccionadas por el cardiólogo

estimando factores como: el diámetro de referencia, diámetro de estenosis, longitud de la lesión y factores relacionados al radio de estenosis como el área y el diámetro (Yan *et al.*, 1978).

El equipo utilizado para la adquisición y visualización del estudio de angiografía es el denominado INNOVA 2000, construido por la *General Electric* y que presenta las siguientes características: Posee un detector digital de estado sólido Revolution, las imágenes completamente digitales presentan un campo de vista de 20.5 cm. x 20.5 cm., las secuencias de imágenes se registran a 30 cuadros por segundo con una resolución de 512 x 512 pixels y cada píxel se representa con 256 niveles de gris ([www.gehealthcare.com](http://www.gehealthcare.com), Sagardi, 2002).

## 3. ANALISIS CUANTITATIVO DE LA FUNCION CARDIACA

### 3.1. Cuantificación de la función ventricular.

La función ventricular esta descrita por un conjunto de parámetros cuantitativos que se obtienen a partir del ventrículo-grama para diástole y sístole adquiridos según la orientación OAD 30°. Tales parámetros se presentan a continuación:

*Volumen del Ventrículo Izquierdo (VVI).* Es el parámetro básico a partir del cual se pueden derivar otros descriptores del VI. En la rutina clínica para el cálculo de VVI a partir de imágenes 2-D, se asume que el ventrículo tiene una forma elipsoidal (Yan *et al.*, 1978), en donde el eje mayor ( $L$ ) de tal forma geométrica corresponde a la longitud entre la válvula aórtica y el ápex (figura 1). Los ejes menores  $D1$  y  $D2$  (perpendicular a  $D1$ ) se consideran iguales y se estiman a partir de la longitud del eje mayor y del área  $A$  (región contenida en el contorno ventricular) en donde  $D1 = D2 = D = 4A/pL$  (Oost *et al.*, 2006). De manera que el volumen del elipsoide vendrá dado por  $V = D^2 L p / 6$ .

*Volumen Latido (VL).* Está definido como el volumen eyectado entre la diástole Final ( $VDF$ ) y la sístole final ( $VSF$ ) y expresado como  $VL = VDF - VSF$  (Folland *et al.*, 1977).

*Fracción de Eyección (FE).* Este índice expresa el acortamiento global de la fibra del VI y está definida como  $FE = (VL/VDF) \times 100\%$  (Oost *et al.*, 2006; Folland *et al.*, 1977).

**Volumen Total del Ventrículo Izquierdo (VT).** En diástole final, la pared epicárdica del ventrículo izquierdo es detectada en la parte superior derecha. De esta manera entre el contorno de la pared interna del ventrículo y el contorno de la pared externa, se genera de manera aproximada un rectángulo, cuya altura  $h$  es un estimado del espesor de la pared ventricular (Yan et al., 1978), como se muestra en la figura 1. Con tal estimación el VT puede ser calculado como  $VT = (L + 2h) \times (D + 2h)^2$ .

**Masa del Ventrículo Izquierdo (MVI).** Este parámetro es generalmente determinado con ayuda de dos factores: el volumen de la cavidad y el espesor de la pared. Para ello se debe suponer que el septum ventricular forma parte del VI y que el volumen del miocardio (VM) es igual al volumen total (VT) contenido dentro de los bordes epicárdicos del ventrículo, menos el volumen de la cavidad en fase diastólica final (VDF). La MVI es obtenida multiplicando VM por la densidad del tejido muscular (1.05 g/cm<sup>3</sup>) (Yan et al., 1978).

$$VM = VT - VDF \quad (1) \quad , \quad MVI = 1.05 \times VM \quad (2)$$

**Cinecia Ventricular:** A partir de la superposición de los contornos ventriculares en Diástole y Sístole se estima una curva que expresa el porcentaje de acortamiento entre ellos (Antoine, 2006).

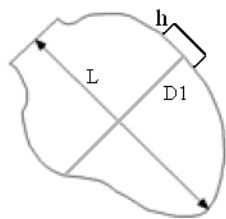


Fig. 1. Contorno ventricular (silueta gris). El rectángulo de altura  $h$  es utilizado para estimar el volumen ventricular total

### 3.2. Valoración de la función coronaria

La enfermedad coronaria es cualquier afectación en las arterias coronarias, habitualmente este termino es sinónimo de lesión obstructiva en la pared de estos vasos que a su vez produce estenosis en su luz (vía de circulación sanguínea), dejando pasar menos cantidad de sangre; siendo la causa mas frecuente la aterosclerosis (Yan et al., 1978). En función de analizar dicho problema es posible estimar los siguientes descriptores (Chandran, 1992):

**Diámetro de referencia (Dref).** Distancia estimada entre las paredes arteriales de luz normal (figura 2).

**Diámetro de estenosis (Dest).** Longitud calculada entre las paredes arteriales afectadas (figura 2).

**Longitud de la lesión (Lles).** Segmento arterial afectado por la obstrucción (figura 2).

**Relación de estenosis.** Para este factor se derivan dos medidas importantes basadas en *Dref* y *Dest* como son:

- **Área (A).** Sección porcentual estimada en función de *Dref* y *Dest*, cuantificándose como  $A = p \times r^2$ .
- **Diámetro (D).** Longitud porcentual valorada como función de *Dref* y *Dest*.

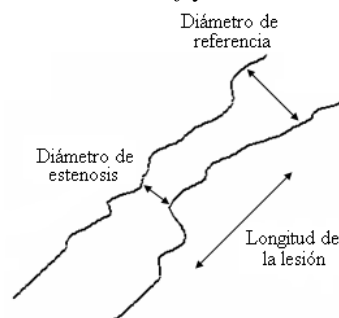


Fig. 2. Contorno arterial

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Función ventricular

El proceso de estimación de los parámetros asociados a la función cardiaca incluye tres etapas: Selección de imágenes angiográficas y trazado del contorno, procesamiento de las imágenes binarias resultantes y finalmente la estimación de los parámetros descriptivos de la función cardiaca.

#### 4.1.1. Selección de imágenes angiográficas

Del estudio de angiografía se eligen 2 imágenes: diástole y sístole final, en donde el especialista traza sus contornos y ubica 6 puntos para diástole (Figura 3(a)). Estos puntos permiten calcular las alturas  $h_{12}$ ,  $h_{34}$  y  $h_{56}$  para obtener un promedio del espesor de la pared  $h$ . Un aspecto importante para la estimación de los parámetros cuantitativos es la resolución espacial (referencia), definida como el tamaño de un píxel en el mundo real (expresado en mm, cm, etc.). Esta se obtiene colocando una esfera de 4 cm (Figura 3(b)) de diámetro al realizar el cateterismo; midiendo esta longitud en pixeles es posible calcular el factor de escala.

#### 4.1.2. Procesamiento de imágenes binarias

Con la información obtenida a partir de las coordenadas de los puntos del contorno en la sección anterior (figura 3(a)), se obtiene una representación binaria de los mismos (figura 4(a)). Con la finalidad de corregir los movimientos globales del ventrículo se superponen los contornos (en diástole y sístole) a través de sus centroides (ecuación 3.) y se rotan de manera tal que los ápex estén alineados (figura 4(b)). (Antoine, 2006). El centroide se estima de la siguiente manera:

$$r' = \frac{1}{A} \times \sum r \quad (3a) \quad , \quad c' = \frac{1}{A} \times \sum c \quad (3b)$$

Definido por las coordenada  $r'$ ,  $c'$ , donde  $r$  representa cada uno de los números de las filas de la forma ventricular y  $c$  los números de columnas de la forma ventricular.  $A$  es el área encerrada por el contorno. Finalmente para el porcentaje de acortamiento se trazan 100 radios desde el centroide hacia el contorno diastólico, (figura 4(b)) (Antoine, 2006).

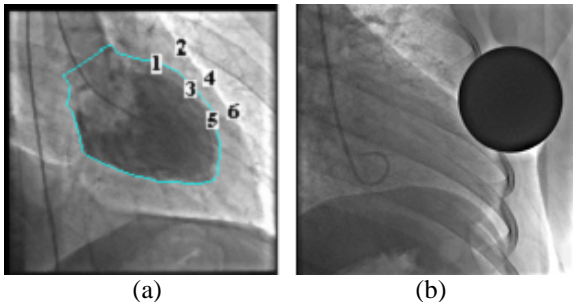


Fig. 3. (a). Ilustración de la ubicación de los puntos para estimar el espesor ventricular  $h$ .  
(b). Imagen de Referencia

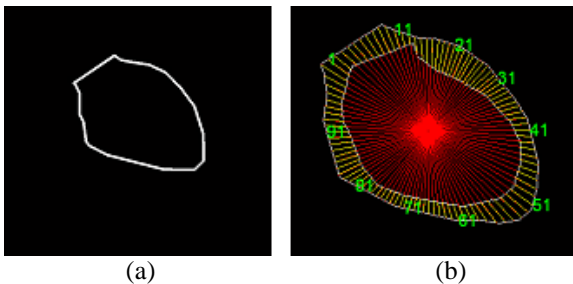


Fig. 4. (a). Imagen binaria del contorno diastólico.  
(b). Superposición del contorno diastólico y sistólico en la cual se marca su diferencia longitudinal (radios amarillos)

#### 4.1.3. Cálculo de los parámetros cuantitativos

Para estimar el valor de los diferentes parámetros descriptores de la función ventricular izquierda, es necesario calcular en primer lugar los valores de  $L$ ,  $D$  tanto para diástole como para sístole y  $h$  para

diástole. Calculando estos valores podremos obtener los descriptores restantes. Por último, en función de obtener la curva de cinécia o porcentaje de acortamiento ventricular, se calcula la longitud del radio desde el centroide común hasta el contorno diastólico, equivaliendo esta medida al 100%, seguidamente se estima la longitud del mismo radio pero ahora desde el contorno sistólico al diastólico (radios en amarillo (figura 4(b))), y se procede a calcular su valor porcentual, con respecto a la distancia entre el centroide y el contorno diastólico (100%). Este resultado es representado en la curva de cinécia, con respecto al número del radio analizado (figura 6(d)) (Antoine, 2006).

#### 4.2. Función coronaria

El proceso de estimación de los parámetros asociados a la función coronaria incluye tres etapas: Selección de la imagen coronaria y región de interés (estenosis), procesamiento de la imagen resultante, y por ultimo la estimación de los parámetros descriptivos.

##### 4.2.1. Selección de la imagen coronaria y región de interés

Del estudio de angiografía se elige una imagen en la cual la lesión pueda ser identificada (figura 5(a)). Apoyados en una herramienta interactiva el especialista procede a demarcar la región a estudiar, indicando el principio y fin de la estenosis, así como también su grosor normal.

##### 4.2.2. Procesamiento de la imagen de interés

Con la información recopilada procedemos a encontrar los puntos del contorno, valiéndonos de un conjunto de rectas perpendiculares a la línea central, generada con los dos puntos mencionados anteriormente (principio y fin de la lesión), y luego aplicando la técnica del gradiente (Bravo et al., 2007), calculamos la máxima variación de niveles de gris a lo largo del perfil definido por cada recta perpendicular a la línea central (figura 5(b)).

##### 4.2.3. Estimación de los parámetros descriptivos

Teniendo ubicados los puntos del contorno a ambos lados de la arteria procedemos a calcular la distancia euclidiana entre ellos y de esta manera podemos estimar el diámetro de referencia, el diámetro de estenosis y la longitud de la lesión. Ahora con la finalidad de calcular los valores enmarcados en la relación o radio de estenosis, se procede de la siguiente manera:



**Área.** Para este indicador estimamos su valor utilizando la ecuación referida en la sección 3.2, primero para el diámetro de referencia (del cual se calcula  $r$ ), medida que equivale al 100%, y luego para el diámetro de estenosis (del cual se estima  $r$ ). Teniendo el cálculo de las dos áreas, estimamos su diferencia y la relación porcentual de esta respecto al 100% ya estimado. Esta cantidad será el valor de área porcentual en la cual la vía arterial ha disminuido.

**Diámetro.** Para obtener este parámetro simplemente comparamos la diferencia de longitud entre el diámetro de referencia y el de estenosis, y se procede de la misma manera que para el área, obteniendo su valor porcentual.

Por último, con la finalidad de expresar nuestras medidas en las unidades indicadas (mm, cm, etc.), tomamos como patrón de conversión el diámetro del catéter (en pixels) y el valor en French de éste (escala comúnmente utilizada para medir el diámetro externo de instrumentos médicos cilíndricos), relacionadas como:  $\text{Diámetro (mm)} = (\text{Valor en French}) / 3$ .

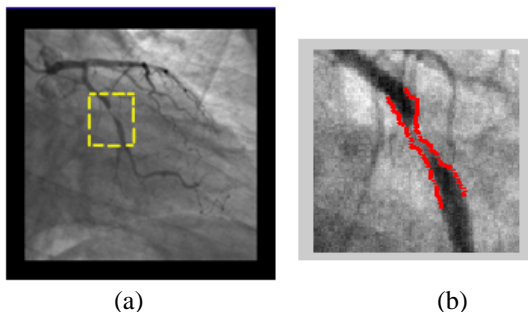


Fig. 5. (a). Imagen coronaria elegida y en la cual se ilustra la zona a procesar. (b). segmentación arterial obtenida.

## 5. RESULTADOS

El sistema desarrollado se sometió a una validación preliminar considerando 2 estudios adquiridos en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de la Universidad de Los Andes (I.A.H.U.L.A.). Los valores obtenidos para cada uno de los parámetros descriptivos tanto de la función ventricular como de la coronaria, son comparados con respecto a los obtenidos por los expertos del Instituto de Cardiología. La figura 6 muestra en primer lugar 2 imágenes (diástole y sístole) a las cuales se les ha trazado el contorno endocárdico. Seguidamente la figura 6(c) presenta la puesta en correspondencia de dichos contornos, luego de haber realizado la

traslación del centroide del contorno sistólico al centroide del contorno diastólico, la alineación de los ápex y el trazado de los 100 radios necesarios para la estimación de la cinecia ventricular. En la figura 6(d) se presenta la curva de porcentaje de acortamiento que describe cuantitativamente la Cinecia ventricular obtenida para los contornos. Por su parte la figura 7 muestra la segmentación obtenida de la arteria, identificando el diámetro de referencia y el de estenosis. Además en ella se imprimen los demás parámetros correspondientes a su análisis.

En la tabla 1 y 2 se presenta una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos para la función ventricular (rotulados como Vcal) y los estimados por el cardiólogo para los dos pacientes considerados (identificados como E1 y E2) Estos resultados representan una validación preliminar del sistema desarrollado. La comparación se expresa en términos del error porcentual. Los valores calculados tanto para el volumen total (VT) como para la masa ventricular izquierda (MVI) son reportados en la tabla 3. En este caso no se incluye la comparación con respecto a los valores obtenidos por el cardiólogo, debido a que tales parámetros no fueron calculados por los expertos médicos. En las tablas 4 y 5 se presentan los resultados correspondientes a la función coronaria calculados y a los estimados por el médico especialista.

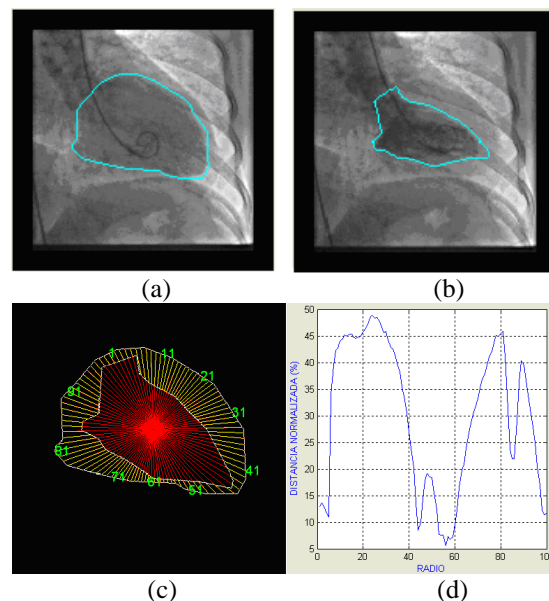


Fig. 6. (a) y (b). Trazo del contorno Diastólico y Sistólico. (c). superposición de contornos (centrados y alineados). (d). Curva representativa del porcentaje de acortamiento.



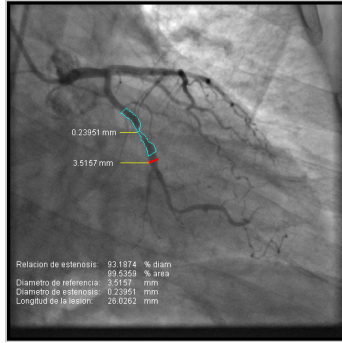


Fig. 7. Imagen resultante del estudio arterial coronario

Tabla 1 y 2. Resultados obtenidos. E=Estudio, Vcal=Valor calculado. Unidades: VDF [mililitros], VSF [mililitros], VL [mililitros], FE [%], Error [%]

	E1	Vcal1	Error
VDF	69	68.5	0.72
VSF	18	17.5	2.77
VL	48	51	6.25
FE	69.7	74.4	6.74

	E2	Vcal2	Error
VDF	79	81.7	3.4
VSF	43	42.6	0.9
VL	36	39	8.3
FE	45.1	47.8	6

Tabla 3. Valores adicionales para ambos estudios

	Vcal1	Vcal2
VT [mililitros]	322.776	453.932
MVI [gr]	266.92	390.851

Tabla 4. y 5 Resultados de la función coronaria y valores de comparación

	E1	Vcal1	Error
Dref [mm]	2.57	2.57	0.0
Dest [mm]	0.73	0.82	12.3
Lles [mm]	14.71	14.17	3.67
Área [mm <sup>2</sup> ]	89.09	89.87	0.02
Diámetro [mm]	68.97	68.17	1.15

	E2	Vcal2	Error
Dref [mm]	3.55	3.51	1.12
Dest [mm]	0.22	0.23	4.54
Lles [mm]	25.5	26.02	2.03
Área [mm <sup>2</sup> ]	98.53	99.53	1.01
Diámetro [mm]	87.88	93.18	6.03

## 6. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar una herramienta semi-automática que resulta útil para la cuantificación de la función coronaria. Los resultados preliminares son promisorios pues el porcentaje de error en el caso ventricular es menor al 8.4%, y en lo referente a las arterias coronarias el error es inferior al 12.4% con pruebas realizadas utilizando datos reales. Como trabajo futuro, se plantea completar la validación considerando un grupo de pacientes más grande y el análisis cuantitativo realizado por varios expertos médicos. Adicionalmente se incorporarán técnicas de segmentación automática.

## REFERENCIAS

- Antoine Simon, 2006. *Extraction et caractérisation du mouvement cardiaque in imagerie scanner multibarrette*. Thèse de la Université de Rennes 1, UFR Structure et Propriétés de la matière.
- Bravo A, 2006. *Simulación y reconstrucción en 4-D del ventrículo izquierdo en imagenología cardiaca*. Tesis Doctoral, Universidad Simón Bolívar, 2006.
- Bravo A., Medina R., Garreau M., Bedossa M., Toumoulin C. and Le Breton H. "An approach to coronary vessels detection in X-ray rotational angiography". CLAIB 2007, IFMBE Proceedings 18, pp. 254–258, 2007.
- Chandran K. B., 1992, *Cardiovascular biomechanics*, New York University Press.
- Folland E. D., Hamilton G W, Larson S M, Kennedy J W, 1977. "The radionuclide ejection fraction: a comparison of three radionuclide techniques with contrast angiography. Diagnostic nuclear medicine", 18: 1159-1166.
- Mackay J., Mensah G., 2004. *Atlas of heart disease and stroke*. World Health Organization.
- Oost E., Koning G., Sonka M., 2006. *Automated contour detection in x ray left ventricular angiograms using multiview active appearance models and dynamic programming*. IEEE transactions on medical imaging, 25:1158-1171.
- Sagardi J. A., 2002. "El detector digital en un sistema de imagen cardiovascular". Revista de Física Médica, 3: 35-38.
- Yan, S.; Lamberto, B.; Vladir M. y Harry, G., 1978. From cardiac catheterization data to hemodynamic parameters, USA: F. A. Davis Company.



**FLows AND STABILITY ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS  
WITH SIMULINK****ANALISIS DE FLUJOS Y ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE  
POTENCIA CON SIMULINK**

**MSc. Abel E. Quezada Carreón\*, MSc. Jorge A. Pérez Venzor\*,  
MSc. Oscar Núñez Ortega\*\*, MSc. David García Chaparro\***

**Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México**

\* Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación

Tel.: (+52) 656-68848 00 Ext. 4741, E-mail: abquezad@uacj.mx.

Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, Chihuahua, México

\*\* Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

**Abstract:** This paper presents an implementation of a simulation tool Matlab/Simulink, which allows power flow analysis and dynamic stability in electric power systems. It has been used Matlab/Simulink because the power flow studies and stability are not included in this software, this gives the analysis and design for use by students of engineering and expertise in the electrical area. The business software's that have this tool are expensive and are focused on electric power networks of multiple nodes, making them inaccessible for teaching purposes.

**Resumen:** En este trabajo se presenta la implementación de una herramienta de simulación en Matlab/Simulink, la cual permite hacer análisis de flujos de potencia y estabilidad dinámica en los sistemas eléctricos de potencia. Se ha utilizado Matlab/Simulink debido a que los estudios de flujos de potencia y estabilidad no están incluidos en dicho software, con esto se aporta el análisis y diseño para ser utilizado por estudiantes de ingeniería y maestría en el área de eléctrica. Los "softwares" comerciales que cuentan con esta herramienta son costosos y están enfocados hacia redes eléctricas de potencia de múltiples nodos, lo cual los hace inaccesibles para fines didácticos.

**Keywords:** Simulation, Matlab / Simulink, power flow, dynamic stability.

## **1. INTRODUCCION**

En este trabajo se presenta la metodología para la elaboración de una herramienta de simulación en Simulink® (Abel Quezada C., 2006).

En la actualidad los estudios de flujos de potencia y estabilidad son de gran importancia (J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, 2004), ya que estos permiten determinar la cantidad de energía que un sistema de potencia puede transferir sin que este se colapse ante perturbaciones o cambios de cargas.

Los programas de simulación que se utilizan en la industria para desarrollar estudios de estabilidad no están diseñados para propósitos de enseñanza. Anteriormente se había desarrollado la herramienta de simulación para estudios de estabilidad, pero era necesario hacer uso de un programa externo que resolviera flujos de potencia. Por esta razón fue necesario desarrollar un programa en Matlab que resolviera flujos de potencia y de esta forma hacer las simulaciones de estabilidad en un mismo software.

El Matlab/Simulink es una herramienta de programación muy popular entre los estudiantes. El desarrollo de una herramienta de simulación para estudios de flujos de potencia y estabilidad en este programa es de gran aportación didáctica. Las máscaras de Simulink permiten personalizar los bloques (agregar textos de ayuda, interfaz de usuario y personalizar el icono del bloque), haciendo que la programación con éstos sea más fácil (The MathWorks Inc., 2002). Los modelos que se utilizan para representar a los componentes del sistema eléctrico de potencia deben de ser adecuados para estudios de control y estabilidad, ya que las ecuaciones de estos no deben de contar con los términos que representan a los transitorios electromagnéticos.

## 2. ANALISIS DE FLUJOS DE POTENCIA

### 2.1. Solución de flujos de potencia.

El problema de flujos de potencia consiste en calcular la magnitud y el ángulo de fase en cada nodo del sistema de potencia en condiciones de estado estacionario. Como subproducto de este cálculo se pueden determinar los flujos de potencia real y reactiva en equipos como líneas de transmisión y transformadores, así como también pérdidas en los mismos (Glover y Sarma, 2004).

Para la solución de flujos de potencia se plantean las ecuaciones no lineales (1) y (2), las cuales se pueden resolver utilizando diferentes métodos numéricos (Kundur, 1993).

$$P_i = V_i^2 G_{ij} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) - B_{ij} \sin(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)) \quad (1)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ij} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) - B_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)) \quad (2)$$

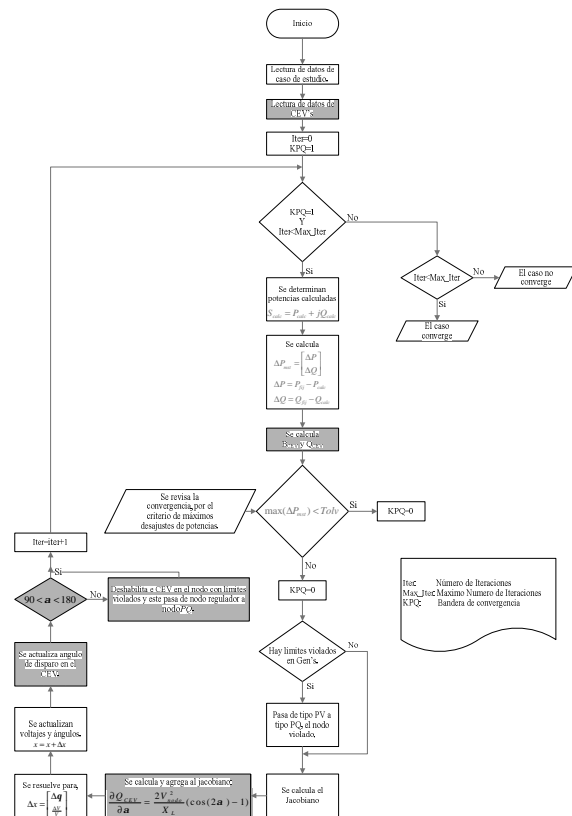
$P_i$  y  $Q_i$  son las Potencias activas y reactivas inyectadas en las terminales de cada elemento del sistema.  $G$  y  $B$  son los elementos de la matriz de admitancias de la red y  $\theta$  es el ángulo de las admitancias de la red.

El método numérico empleado en este trabajo es el de Newton-Raphson (NR) debido a que la mayor parte de los sistemas convergen en un número no mayor a 10 iteraciones (Tinney y Hart, 1967). Para aplicar el método NR al problema de flujos de potencia, las ecuaciones (1) y (2) se deben expresar en la forma de la ecuación (3), y se resuelve para el conjunto de magnitudes y ángulos de voltajes nodales desconocidos (Kundur, 1993).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \mathbf{q}} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{q}} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{q} \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2.2. Implementación de la solución de flujos de potencia en MATLAB

En la figura 1 se muestra el diagrama esquemático con el cual fue programado el método de NR para la solución de flujos de potencia.



*Fig. 1. Diagrama esquemático de flujos de potencia*

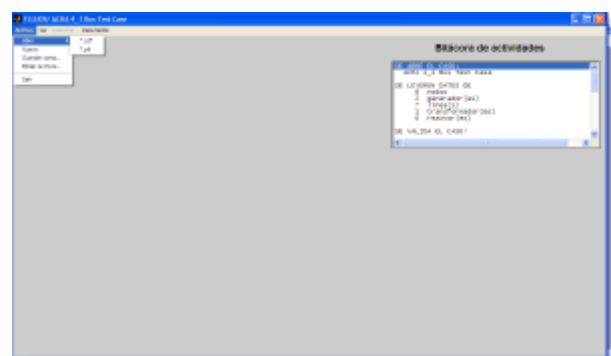


Fig. 2. Ventana principal del simulador flujos

En la figura 2 se muestra la interfaz que se construyó en MATLAB para la adquisición de datos. Los datos pueden ser ingresados en 3 formas: Directamente a través de la interfaz, mediante un archivo en formato '\*.cdf' (*Common Data Format*) [5] y mediante un archivo en formato '\*.ptl' (*Power Tech Laguna*).

Los resultados se pueden desplegar en 4 formas:

- Texto.- Despliega los resultados en forma de texto en 3 formas:  
*Nodales*.- Permite visualizar las magnitudes de los voltajes y ángulos nodales  
*Flujos de carga*.- Permite visualizar los flujos de potencias activa y reactiva entre nodos.  
*Generación*.- Permite visualizar potencias activa y reactiva de generación.
- Gráfico.- Despliega una gráfica de las magnitudes de los voltajes nodales.
- Imprimir archivo.- Genera la impresión de los resultados del caso de estudio en un archivo tipo 'm'. También genera la impresión de una salida gráfica de las magnitudes de voltajes nodales en formato '.jpg'.
- Archivo para estabilidad.- Graba un archivo tipo "m" en el formato adecuado para ser leído por la herramienta de simulación presentada en la parte 3 de este artículo.

### 3. ANALISIS DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

#### 3.1. Modelo básico del problema de estabilidad.

La estabilidad se define como la propiedad de un sistema de potencia para permanecer en un estado de operación equilibrado bajo condiciones normales y recuperar un estado estable de equilibrio después de estar sujeto a un disturbio (Kundur, 1993).

El modelo para estudios de estabilidad esta diseñado con la aproximación quasi-senoidal de los sistemas dinámicos de potencia (van Cutsem y Vournas, 1998):

$$dx/dt = f(x, v_x, v_y) \quad (4)$$

$$\tilde{I}(x, v_x, v_y) - Y \cdot \tilde{V} = 0 \quad (5)$$

- (1) Donde  $x$  es el correspondiente vector de estado de generadores síncronos, máquinas de inducción etc.
- (2) Es la ecuación de la red, en donde  $I$  es el fasor complejo de corrientes inyectadas a la

red de dimensión  $n$ .  $\tilde{V}$  es el fasor de voltajes en los nodos de dimensión  $n$ , y  $Y$  es la matriz de admitancias de la red de dimensión  $n \times n$ .

#### 3.2. Implementación de la Herramienta de Simulación en Simulink

Se diseñó una librería de bloques en Simulink, los cuales permiten resolver la ecuación (5). En donde el fasor de corriente ( $I$ ) es obtenido de los elementos conectados al sistema de potencia (generadores, equivalentes de Thevenin, motores de inducción y cargas estáticas). La matriz de admitancias  $Y$  es obtenida del programa que soluciona flujos de potencia (Parte 2). Finalmente queda una incógnita a resolver que es el fasor de voltaje ( $V$ ) en los nodos.

Todos los bloques de los elementos del sistema son diseñados de tal forma que tengan el voltaje  $V$  del nodo correspondiente como entrada y la corriente inyectada a la red como salida "I", tal como lo ilustra la figura 3. Para el caso del generador síncrono fue necesario agregar 2 señales más: el voltaje de campo ( $V_{fd}$ ) y la velocidad del rotor ( $w_r$ ), esto con el fin de incorporar al mismo controladores de excitación (AVR) y estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) (IEEE *Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines* 2007).

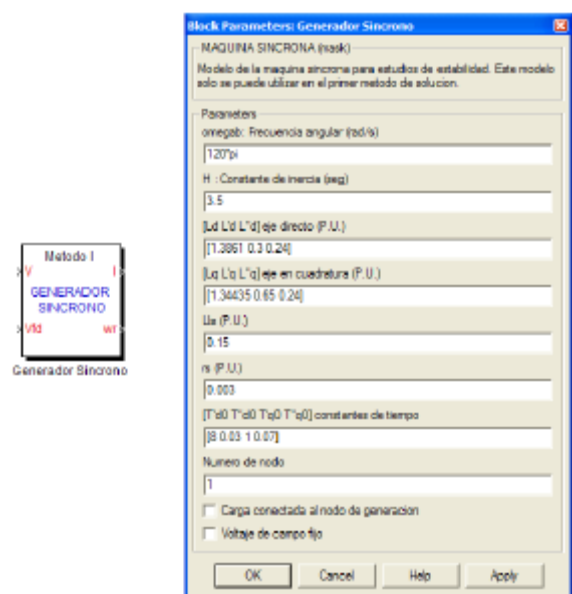


Fig. 3. Bloque del generador Síncrono

El bloque de red esta diseñado de tal forma que la entrada a este, sean los fasores de corrientes ( $I$ )

provenientes de los bloques que representan a los elementos del sistema de potencia, y la salida del mismo sean los fasores de voltaje ( $\tilde{V}$ ) en los nodos (figura 4). Los datos que se asignan en la interfaz se utilizan para especificar la falla.

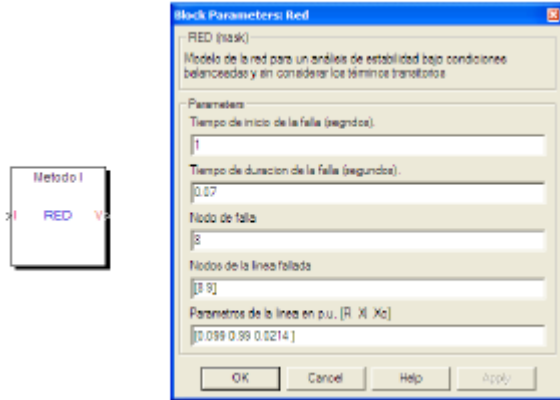


Fig. 4. Bloque de la red

### 3.3. Metodología implementada para realizar simulaciones

En el siguiente ejemplo se muestra algunos rasgos sobresalientes de esta herramienta de simulación. En este caso de estudio se analiza un sistema de potencia de 11 nodos, el cual es dividido en 2 áreas similares como se observa en la figura 5 (Kundur, 1993).

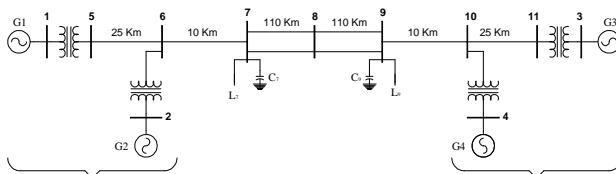


Figura 5. Sistema de Potencia de 5 nodos

Los parámetros de los generadores en por unidad considerando una base de 900 MVA y 20 KV son los siguientes:

$$\begin{array}{lllll} X_d=1.8 & X_q=1.7 & X_{ls}=0.2 & X'_d=0.3 & X'_q=0.55 \\ X''_d=0.25 & X''_q=0.25 & r_s=0.0025 & T'_{d0}=8.0 & T'_{q0}=0.4 \\ T'_{d0}=0.03 & T'_{q0}=0.05 & H=6.5 \text{ (Para G1 y G2)} & & \\ & & H=6.175 \text{ (Para G3 y G4)} & & \end{array}$$

La impedancia de los transformadores es de  $0+j0.15$  con una base de 900 MVA y 20/230 KV. Las longitudes de las líneas están definidas en la figura 5.8, y los parámetros en por unidad con una base de 100 MVA, 230 KV son:

$$\begin{array}{lll} r=0.0001 & X_{ls}=0.001 & b_c=0.00175 \\ \text{pu/km} & \text{pu/km} & \text{pu/km} \end{array}$$

Las cargas fijas aplicadas en los nodos 7 y 9 son:

Nodo	$P_L = 967$	$Q_L = 100$	$Q_C = 200$
7:	MW	MVAR	MVAR
Nodo	$P_L = 1767$	$Q_L = 100$	$Q_C = 350$
9:	MW	MVAR	MVAR

La metodología utilizada para realizar la simulación de estabilidad se puede observar en la figura 6.

En este modelo se observa que cada elemento del sistema es representado mediante un bloque y todos se conectan al bloque de red, además el número de entradas al bloque de red corresponde al número de buses del sistema. Las etiquetas [V1] y [V1] indican que existe una conexión oculta.

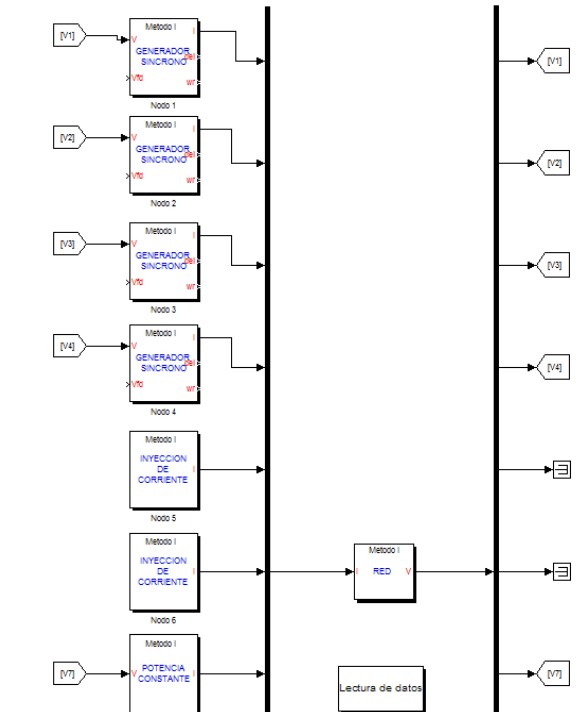


Fig. 6. Implementación del sistema de potencia en Simulink

En la figura 6, también se observa un bloque que dice "lectura de datos" dándole doble clic a este bloque se ejecuta un archivo m, el cual se encarga de realizar la lectura de la información proveniente del programa que resuelve flujos de potencia (Parte 2).

Con los datos provenientes de flujos de potencia es posible inicializar las variables dinámicas del sistema y partir de un estado estacionario.



#### 4. RESULTADOS

Para demostrar los resultados que se obtienen de esta herramienta de simulación consideramos el sistema de potencia de la figura 5 (Kundur, 1993). En este caso de estudio se analiza la respuesta del sistema de potencia con diferentes alternativas de excitación cuando se presenta una falla en el nodo 8, cuya duración es de 0.07 segundos y se aclara mediante la salida de una de las líneas conectadas en los nodos 8 y 9.

Se pretende analizar la estabilidad del sistema con las siguientes alternativas de controles de excitación (IEEE *Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*, 2007).

- Control manual, manteniendo constante  $E_{fd}$ .
- Sistema de excitación DC1A con PSS.
- Sistema de excitación AC4A con PSS.

En las figuras 7 a 9 se muestra la respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) de los generadores 3 al 4 en relación con el generador 1.

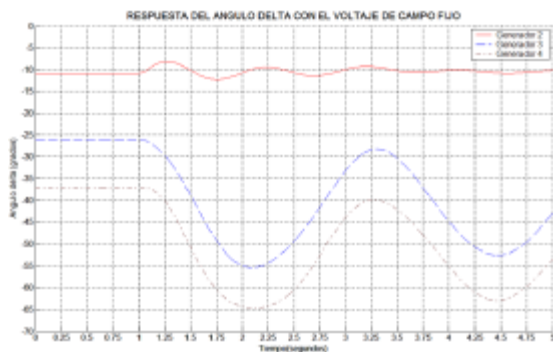


Fig. 7. Respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) con el voltaje de campo fijo

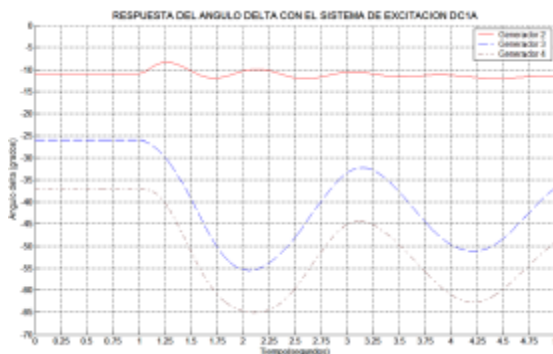


Fig. 8. Respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) con el sistema de excitación DC1A con PSS

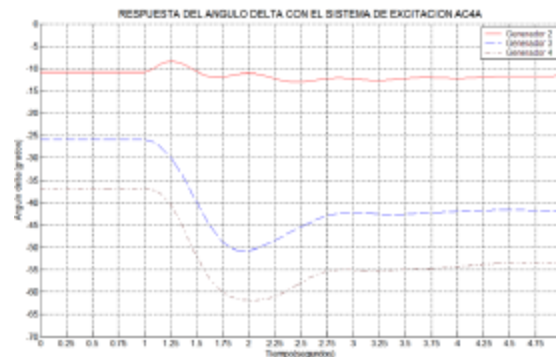


Fig. 9. Respuesta del ángulo de carga ( $\delta$ ) con el sistema de excitación AC4A con PSS

En estas gráficas se observa que el sistema se mantiene en sincronismo con y sin sistemas de excitación, también se observa que el generador 2 tiene menor variación debido a que está más cerca del generador 1 y más alejado de la falla.

En las gráficas 8 y 9 se observa como los sistemas de excitación ayudan a amortiguar las oscilaciones, en donde el sistema de excitación AC4A estabiliza en un menor tiempo al sistema de potencia.

El simulador de flujos de potencia se comparó con el simulador *Power World Simulator* y se obtuvieron los mismos resultados. Para el caso del simulador de estabilidad se revivió un caso de estudio de 4 generadores conectados a un bus infinito (Kundur, 1993) y se compararon las gráficas y se obtuvieron los mismos resultados.

#### 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la metodología para la elaboración de una herramienta de simulación de estabilidad y flujos de potencia en Matlab/Simulink.

Se realizó un estudio de estabilidad para un sistema de potencia multi-máquinas y se observó la respuesta del sistema ante una falla, se probaron diferentes controles de excitación, dando como resultado un modelo estable. Con esta Herramienta de simulación se simplifica la forma de analizar problemas de estabilidad en sistemas de potencia utilizando un solo programa (Matlab/Simulink) a diferencia de (Quesada, 2006) donde se utilizaban dos programas para obtener el mismo resultado.

El desarrollo de una herramienta de simulación para estudios de control y estabilidad en Matlab/Simulink es de gran aportación didáctica.

## REFERENCIAS

- MathWorks, Inc (2002). *Simulink Model-Based and System-Based Design*.
- Kundur, P. (1993) *Power System Stability and Control* in EPRI Power System Engineering Series. McGraw-Hill, Inc.
- Duncan Glover, J.; Sarma, Mulukutla S. (2004) *Sistemas de Potencia Análisis y Diseño*. Thomson, Tercer edición.
- Tinney, W. F. y Hart, C. E. (1967), "Power Flow Solutions by Newton's Method", IEEE Trans. PAS 86, pág. 1449.
- IEEE Flow Data (1973). *Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems\_, Vol. PAS-92, No. 6, pp. 1916-1925.
- van Cutsem, T. y Vournas C. D. (1998). *Voltage Stability of Electric Power System*. Power Electronics and Power Systems Series. Kluwer Academic Publishers.
- IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines (2007), Standard Definitions for Excitation Systems, IEEE Std. 421.1<sup>TM</sup>.
- Quezada C., Abel y Vargas S., Ricardo. (2006). "Herramienta de Simulación para Control y Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia basada en Simulink". Reunión de Verano de Potencia 2006

**STUDY AND CLASSIFICATION OF CHAGASIC PATIENTS USING  
MULTIVARIATE STATISTICAL TECHNIQUES****ESTUDIO Y CLASIFICACION DE PACIENTES CHAGASICOS UTILIZANDO  
TECNICAS ESTADISTICAS MULTIVARIANTES****MSc. Luis Enrique Mendoza\*, PhD. Delfina M. Padilla \*\***

\* Postgrado de Ingeniería Biomédica, **Universidad de los Andes**, Facultad de Ingeniería, Mérida 5101, Venezuela, E-mail: luenmecaib@gmail.com.

\*\* Departamento de Cálculo, **Universidad de los Andes**, Facultad de Ingeniería, Mérida 5101, Venezuela. E-mail: pdelfina@ula.ve.

**Abstract:** The study of cardiac arrhythmia from electrocardiogram signals (ECG), has been an extensive field research in biomedical engineering, with the pathologies associated with Chagas disease one of the highest scientific interest in recent years. This article presents results of recent studies to extract information from a subspace of features smaller than the original using multivariate statistical techniques, and thus properly classified and quick healthy patients, Chagas patients and mild chronic Chagas patients. Other techniques used in the study are: the wavelet transform and dynamic programming.

**Resumen:** El estudio de arritmias cardíacas a partir de señales electrocardiográficas (ECG), ha sido un campo de extensa investigación en la ingeniería biomédica, siendo las patologías relacionadas con la enfermedad del chagas una de las de mayor interés científico en los últimos años. Este artículo presenta resultados de recientes estudios realizados para extraer información de un subespacio de características de menor dimensión que el original utilizando técnicas estadísticas multivariantes, y así clasificar de forma correcta y rápida pacientes sanos, pacientes chagas leve y pacientes chagas crónico. Otras técnicas utilizadas en el estudio son: la transformada wavelet y programación dinámica.

**Keywords:** ECG signals, Chagas disease, multivariate techniques, classification.

**1. INTRODUCCION**

En la fisiología humana, el análisis del sistema cardíaco ha sido de gran importancia durante muchas décadas, esto se debe a que el sistema cardíaco tiene gran repercusión del funcionamiento fisiológico total del ser humano. El estudio del sistema cardiaco con base en señales ECG, han proporcionado resultados los cuales muestran que se pueden detectar arritmias cardíacas tales como: taquicardias ventriculares y mal de chagas, entre otros (Rasoul *et al.*, 2007); (Mark *et al.*, 1998);

(Bonnefoy *et al.*, 2000). El estudio, caracterización y clasificación de arritmias cardíacas, específicamente las encontradas en el complejo QRS, el cual se encuentra presente en la señal ECG, tienen gran importancia en el mundo de la medicina, ya que fisiológicamente, el complejo QRS, representan la despolarización ventricular del ciclo cardiaco (Mithilesh *et al.*, 2007); (Florim *et al.*, 2007). El mal de chagas es un enfermedad típica en América, generando una alta tasa de mortalidad en la última década, debido al tardío diagnóstico médico; el mal de chagas se puede

detectar específicamente en los complejos QRS o en el segmento ST de la señal ECG (Gan-Xin *et al.*, 1999), Figura 1. Diferentes trabajos han desarrollado técnicas para la detección de arritmias cardíacas, específicamente para el estudio y clasificación de pacientes con mal de chagas (Marta *et al.*, 2006); (Tomás *et al.*, 2006), una desventaja de estos métodos desarrollados es la sensibilidad que las señales tienen al ruido, esto es causado por la poca tasa de muestreo que poseen los dispositivos de captura de la señal ECG (Caryn *et al.*, 2007).

La enfermedad del chagas es causada por un parásito llamado: *Trypanosoma cruzi*, usualmente se transmite por: picadura del insecto, transfusiones sanguíneas, transplante de órganos y raramente por ingestión de comida o bebidas contaminada (Caryn *et al.*, 2007). La transmisión del parásito ocurre en el continente Americano donde aproximadamente entre 8-10 millones de personas poseen esta mal.

En países como Colombia y Venezuela, más del 40% de la población esta expuesta a padecer este mal, por estos motivos, este trabajo se basa en el estudio de pacientes chagásicos, con el fin de ayudar al médico a diagnosticar esta enfermedad en fases tempranas, y lograr reducir la tasa de mortalidad que aquejan a los países Americanos.

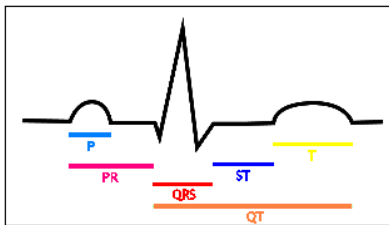


Fig. 1. Señal ECG

## 2. METODOS

La base de datos fue tomada del grupo de ingeniería biomédica de la Universidad de los Andes GIBULA, la base de datos contiene 10 sujetos sanos, 8 sujetos con chagas leve y 10 sujetos con chagas crónico, los datos fueron adquiridos a una frecuencia de muestreo de 1Khz.

### 2.1. Detección complejo QRS

La transformada wavelet (TW), es una técnica multiresolución, que permite descomponer una señal o una imagen en diferentes niveles en un plano tiempo-escala (Zhang, 2005). En este trabajo se usa la wavelet madre *symle 7*, con un nivel de

descomposición 5, y se eligió el nivel de detalle 2, para encontrar la duración del complejo QRS, ya que representa de forma adecuada el inicio y fin de las componentes frecuenciales de la onda QRS (Laciar *et al.*, 2000).

Matemáticamente la TW se expresa (Sydney *et al.*, 1998):

$$c(t, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * y \left[ \frac{t-t}{s} \right] dt \quad (1)$$

$\psi[t]$ : Wavelet madre

$f(t)$ : Señal original

$t$ : Coeficientes traslación,

$s$ : Coeficientes de escala.

### 2.2. Alineamiento de secuencias

El Alineamiento de secuencias se realiza como una aplicación de la programación dinámica, en la cual se permiten identificar correspondencias exactas o aproximadas entre subsecuencias de caracteres (Weichun *et al.*, 2005), en este trabajo se implementó el algoritmo de lineamiento global, con el objetivo de alinear los complejos QRS de los diferentes pacientes. Las ondas QRS se alinearon utilizando un punto fiduciario, en este trabajo el punto es identificado como el pico máximo de la onda R.

Matemáticamente el alineamiento global se expresa (Weichun *et al.*, 2005):

Condiciones iniciales

$$M(i, 0) = -d * i \quad 0 \leq i \leq n \quad (2)$$

$$M(0, j) = -d * j \quad 0 \leq j \leq m$$

$n, m$ : Tamaños secuencias 1 y 2 respectivamente.

$d$ : Penalización por inserción de espacios.

Fórmula recursiva

$$M(i, j) = \begin{cases} M(i-1, j-1) + score(x_i, y_j) \\ M(i, j-1) + d \\ M(i-1, j) + d \end{cases} \quad (3)$$

Para  $1 \leq i \leq n$  y  $1 \leq j \leq m$

$score(x_i, y_j)$ : Puntaje de alinear elemento  $i$  de la secuencia  $x$  con el elemento  $j$  de la secuencia  $y$ .

### 2.3. Análisis de componentes principales (ACP) y Clasificadores Multivariantes

Cuando el investigador dispone habitualmente de muchas variables medidas en una colección de individuos y pretende estudiarlas conjuntamente, suele acudir al análisis estadístico de datos (Lebart *et al.*, 1982); (Diday *et al.*, 1982). Al observar muchas variables sobre una muestra es presumible que una parte de la información recogida pueda ser redundante, en cuyo caso los **métodos multivariantes de reducción de la dimensionalidad** tratan de eliminarla. Por otro lado, los individuos pueden presentar ciertas características comunes en sus respuestas, que permitan intentar **su clasificación en grupos** de cierta homogeneidad (José *et al.*, 2004).

En este trabajo se utilizaron técnicas estadísticas como ACP, con el objetivo de disminuir dimensionalidad de los datos y obtener un plano de control donde se ubicaron los pacientes sanos, pacientes chagas leve y pacientes chagas crónico. El centroide y discriminante canónico, se utilizaron para clasificar un nuevo paciente que ingresa al plano de control.

Modelo matemático ACP y clasificadores (José *et al.*, 2004); (César 2004).

$$X = \{x_{ij}\} \quad (4)$$

X matriz original  $n \times p$ ,  $i = 1 \dots n$  son las observaciones y  $j = 1 \dots p$  y son las variables.

El propósito es hallar un subespacio de dimensión  $m$ ,  $m \leq p$

$$Z_1 = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T = x_1 a_1 \quad (5)$$

Finalmente,  $(S - II)a = 0$   $a, I, S$  son vector propio, valor propio y covarianza respectivamente.

$$d_1 = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l x_k \quad d_2 = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l y_k \quad (6)$$

$x_k$  y  $y_k$  son las componentes en  $x$  y  $y$  respectivamente de las secuencias.

$$C = (d_1, d_2) \quad \text{Centroide} \quad (7)$$

$$d = \sqrt{\sum_i (a_i - b_i)^2} \quad \text{Distancia euclidiana} \quad (8)$$

$a_i$ , Secuencia a, y  $b_i$  Secuencia b.

### 3. RESULTADOS

La figura 2, muestra el nivel de descomposición utilizado para detectar la ubicación del complejo QRS y la duración del mismo. La tabla 1 ilustra la relación comparativa de la duración del complejo QRS encontrada en el dominio del tiempo y la detección en el dominio frecuencial. El algoritmo se ensayó en 100 complejos QRS, con error de 9%.

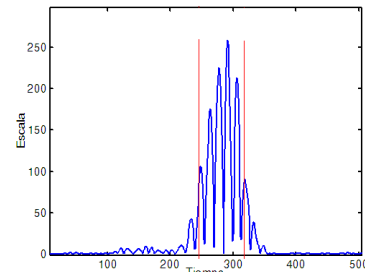


Fig. 2. Ubicación complejo QRS

Tabla 1. Comparación duración ondas QRS

	Complejo QRS			
Detección	1(ms)	2(ms)	3(ms)	Error
Tiempo	118±3	120±4	120±3	9%
Frecuencia (TW)	117±5	120±4	120±2	

En la figura 3, a y b, se muestra el resultado al aplicar el algoritmo de alineamiento entre dos porciones de señal ECG, el alineamiento toma como punto clave el pico máximo de la onda R.

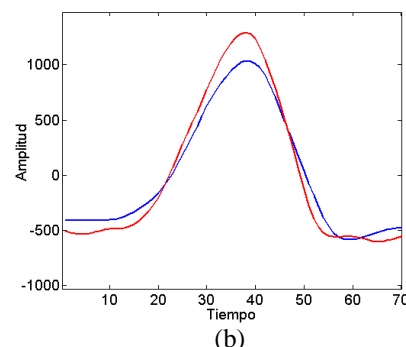
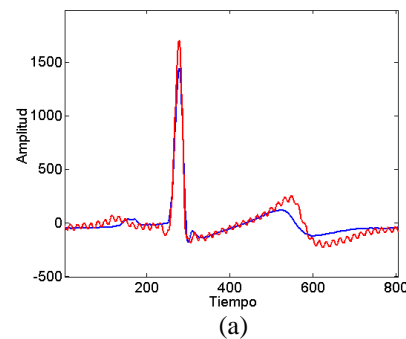


Fig. 3. Alineamiento de señales ECG

La figura 4, presenta el plano que se diseñó con el uso de la técnica ACP, este plano se utilizó para clasificar los diferentes pacientes: chagas leve, chagas crónico y normales. En este plano existen 3 regiones, la primera presenta sujetos normales (color amarillo), la segunda región representa sujetos chagas leve (color violeta) y la tercera región representa sujetos chagas crónico (color verde), la clasificación se desarrolló teniendo en cuenta la posición de un nuevo paciente y los resultados de los métodos de clasificación usados en este trabajo. La tabla 2, muestra algunos resultados totales que se han obtenido.

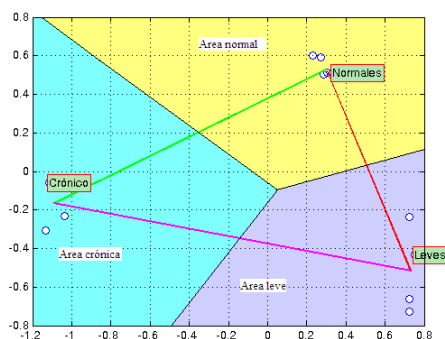


Fig. 4. Plano de clasificación

Tabla 2. Resultados de clasificación

	# pacientes	% clasificación	% error
Pacientes sanos	15	93.33	6.67
Pacientes leves	10	80	20
Pacientes crónicos	13	92.3	7.7
Total resultados	38	89.47	10.52

#### 4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Con el uso de la TW se pueden realizar análisis más profundos y más exigentes en el plano tiempo-frecuencia que proporciona esta técnica. El estudio e implementación de la TW, fue de gran ayuda para disminuir el tiempo de ejecución del trabajo total, ya que se pudo ubicar ciertas zonas de interés como lo fue la ubicación del inicio y del fin del complejo QRS. La programación dinámica proporciona características muy importantes si se logra utilizar de forma correcta o si se tiene claro que tipo de aplicación se debe utilizar para el desarrollo del proceso a trabajar. El alineamiento de secuencias es muy provechoso para comparar

información de cualquier tipo y conseguir el mayor grado de similitud entre los datos presentes, este grado de similitud se da ya que se obtienen secuencias de los datos originales de forma que sus correlaciones sean más altas. Los métodos multivariantes de datos son muy importantes para lograr clasificar ciertas clases de objetos (sujetos en nuestro caso), el método de clasificación dependerá de las características de los datos, y en ciertas ocasiones se da con la ayuda de las propiedades estadísticas de los datos a trabajar.

Los métodos multivariantes lineales no son muy adecuados para clasificar datos que provengan de sistemas fisiológicos como por ejemplo datos que muestran el comportamiento del sistema cardíaco, por esto se recomienda utilizar métodos de clasificación no lineales tales como métodos bayesianos, máquinas de vectores soporte y kernel-ACP, que están siendo estudiados actualmente, con el fin de mejorar los resultados obtenidos hasta la fecha.

#### AGRADECIMIENTOS

Al grupo de ingeniería biomédica de la Universidad de los Andes Mérida-Venezuela GIBULA.

#### REFERENCIAS

- Rasoul, M. J. de Boer, H. Suryapranata, Hoorntje, A. Gosselink, F. Zijlstra, J.P. Ottervanger, J. H. E. Dambrink, A.W. J. van 't Hof. (2007). *Circumflex artery-related acute myocardial infarction: limited ECG abnormalities but poor outcome*. Netherlands.
- Mark, A. Marinella, M. (1998). *Electrocardiographic Manifestations and Differential Diagnosis of Acute Pericarditis*.
- Bonnefoy, E.; Godon, P.; Kirkorian, G.; Fatemi, M.; Chevalier, P. and Touboul, P. (2000). *Serum cardiac troponin I and ST-segment elevation in patients with acute pericarditis*. Lyon, France.
- Mithilesh, K.; Bilal, K.; Sony, J.; Awaneesh, K. and Jo, M. (2007). *Significance of a Fragmented QRS Complex Versus a Q Wave in Patients With Coronary Artery Disease*.
- Florim, C.; Richard, K. and Paul, E. (2007). *ECG changes following cardioversion and defibrillation*. Department of Cardiology. Kantonsspital Luzern, Switzerland.



- Gan-Xin, Y. Charles, A. (1999). Cellular Basis for the Brugada Syndrome and Other Mechanisms of Arrhythmogenesis Associated With ST-Segment Elevation.
- Marta, V. Richard, R. and Ricardo, E. (2006). Use of an Immuno-chromatographic Dipstick Test for Rapid Detection of Trypanosoma cruzi in Sera from Animal Reservoir Hosts.
- Tomás, F. Jorge, A. María, C. Alonso, P. Luis, A. Nilda, G. Adriana, N. Adelina, R. and Horacio, A. (2006). Early detection of left ventricular diastolic dysfunction in Chagas' disease.
- Caryn, B. Susan, P. Barbara, L. Anis, R. Jose, A. Marin, N. James, H. Harry, A. Carlos, M. Louis, V. Robert, H. Pedro, A. Roberto, S. Anne C. (2007). Evaluation and Treatment of Chagas Disease in the United States.
- Zhang, D. (2005). Wavelet Approach for ECG Baseline Wander Correction and Noise Reduction.
- Laciar, E. Jané, R. and Brooks, D.H. (200). Beat-to-Beat Analysis of QRS Duration in Time and Wavelet Domains.
- Sidney, B. Ramesh, G. Haitao, G. (1998). Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms A primer Texas, 200-532.
- Weichun, H. David, M. and Leping L. (2005). Accurate anchoring alignment of divergent sequences. USA.
- Diday, E. Lemaire, J. Pouget, J. and Testu, F. (1982). Elements d'analyse de données, Dunod. France. 116-375.
- Lebart, L. Morineau, A. Fénelon, and J-P. (1982). Traitement des données statistiques, Dunod. France. 273-373.
- José, H. José, R. and César F. (2004). Introducción a la minería de datos. PEARSON Printice-Hill. España. 166-252.
- César, P. (2004). Técnicas de análisis multivariante de datos aplicados con SPSS. PEARSON, Prentice-Hall. 121-153.

## RELIABILITY EVALUATION WITH A MARKOV CHAIN MODEL OF A GROUP OF 3 PUMPS

## EVALUACION DE CONFIABILIDAD CON UN MODELO DE CADEMAS DE MARKOV DE UN GRUPO DE 3 BOMBAS

Ing. Carolina Casanova, PhD. Cesar Contreras

Universidad Nacional Experimental del Táchira

Laboratorio de Instrumentación, Control y Automatización, San Cristóbal, Venezuela.  
Tel.: (58)(276) 353-0422, E-mail: ccontre@unet.edu.ve

**Abstract:** There are different methodologies to analyze the reliability of a system, this work describes the analysis with Markov chain model and an example is develop evaluating and simulating the reliability of a group of 3 pumps, with redundancy of 2/3.

**Resumen:** Existen diferentes metodologías para analizar la confiabilidad de un sistema, en este trabajo se describe el análisis de Markov y se hace un ejemplo evaluando y simulando la confiabilidad de un grupo de 3 bombas, con redundancia de 2/3.

**Keywords:** Reliability, Reliability Evaluation, Markov chains.

### 1. INTRODUCCION

La historia de la confiabilidad se remonta a los primeros años 30 donde los conceptos de la probabilidad se aplicaron a los problemas relacionados con la generación de la energía eléctrica (Lyman, 1933, Dhillon, 1983). Durante la Segunda Guerra Mundial, los alemanes aplicaron los conceptos básicos de la confiabilidad para mejorar la confiabilidad de sus cohetes V1 y V2. En 1947, Aeronáuticas Radio, Inc. y la universidad de Cornell condujeron un estudio de la confiabilidad sobre 100.000 tubos electrónicos. En 1950, el departamento defensa de Estados Unidos estableció a un comité ad hoc sobre confiabilidad y en 1952 fue transformado a un cuerpo permanente: denominado Grupo consultivo de la confiabilidad de equipos electrónicos (AGREE).

Entonces la Confiabilidad en general: *se define como la probabilidad de que un sistema cumpla con la tarea asignada de forma satisfactoria en el período indicado y bajo condiciones especificadas.*

A continuación se presentan tres conceptos usados para definir la confiabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia.

- Es la habilidad del sistema para proveer energía eléctrica a los puntos de utilización en la cantidad requerida y con un nivel aceptable de calidad y seguridad.
- Refleja la robustez del sistema, tanto a respuestas a contingencias, continuidad del suministro, calidad del servicio prestado.
- La Confiabilidad busca el cabal cumplimiento de la función para la cual fue concebido un sistema en un periodo de tiempo especificado, sin menoscabo de su vida útil.

Estos conceptos muestran que la Confiabilidad es producto de la Seguridad que es la capacidad de respuestas a contingencias estáticas y dinámicas, La Calidad técnica y comercial junto a la continuidad del servicio y a Suficientes instalaciones para satisfacer la demanda total y las restricciones del sistema.

Hay diferentes métodos de evaluación de la confiabilidad y entre estos tenemos:

- Reducción de la Red
- Método de descomposición
- Método DELTA-ESTRELLA
- Método de conteo de partes
- Método de MARKOV

Para el cálculo de la confiabilidad hay varios tipos de distribución de la probabilidad, los mas usados son: Binomial, Poisson, exponencial, Rayleigh, Weibull, General, y Normal. En este artículo se usa para el ejemplo la distribución exponencial.

### 1.1 Análisis de Markov

El análisis de Markov, llamado así en honor de un matemático ruso que desarrolló el método en 1907, permite encontrar la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado en particular en un momento dado. Algo más importante aún, es que permite encontrar el promedio a la larga o las probabilidades de estado estable para cada estado. Con esta información se puede predecir el comportamiento del sistema a través del tiempo. Esta es una herramienta de gran alcance del análisis de la confiabilidad y puede ser utilizada en más casos que cualquier otro método. El método de Markov se utiliza extensamente para modelar sistemas con fallas y reparaciones con promedio constante. A excepción de algunos casos especiales, la técnica es aplicable a sistemas que tengan promedios de falla y reparación dependientes del tiempo. Para la solución de los problemas se plantea una cadena de Markov y un conjunto de ecuaciones diferenciales facilitando la solución de los sistemas grandes y complejos. Una cadena de Markov es una serie de eventos, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediato anterior. En efecto, las cadenas de este tipo tienen memoria. "Recuerdan" el último evento y esto condiciona las posibilidades de los eventos futuros. Esta dependencia del evento anterior distingue a las cadenas de Markov de las series de eventos independientes, como tirar una moneda al aire o un dado. Para esto se asumen las siguientes condiciones:

1. Los eventos de transición son independientes
2. La probabilidad de transición de un estado a otro del sistema en el intervalo de tiempo finito  $\Delta t$  está dado por  $\lambda \Delta t$ , donde  $\lambda$  es la frecuencia de falla (o en otro caso promedio de reparación)
3. La probabilidad de que ocurra más de un evento de transición entre un estado y otro en el tiempo  $\Delta t$  es muy pequeña, es despreciable.

## 2. METODO

### 2.1 Ecuaciones

El diagrama de espacio de estado de un sistema se muestra en la figura 1, el cual puede estar en operación normal (estado 0) o en falla (estado 1), este sistema falla con una rata de falla constante  $\lambda$  y también es reparado con una rata de reparación constante  $\mu$ . Las ecuaciones de probabilidad del sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned} P_0(t + \Delta t) &= P_0(t)(1 - \lambda \Delta t) + P_1(t) \mu \Delta t \\ P_1(t + \Delta t) &= P_1(t)(1 - \mu \Delta t) + P_0(t) \lambda \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

t: Tiempo

$\lambda \Delta t$ : Probabilidad de que el sistema falla en un intervalo de tiempo finito  $\Delta t$ .

$(1 - \lambda \Delta t)$ : Es la probabilidad de que no falle en un intervalo de tiempo finito  $\Delta t$ .

$\lambda \Delta t$ : Es la probabilidad de que el sistema sea reparado en un intervalo de tiempo finito  $\Delta t$ .

$(1 - \mu \Delta t)$ : Es la probabilidad de que no se repare en un intervalo de tiempo finito  $\Delta t$ .

$P_0(t + \Delta t)$ : Es la probabilidad de que el sistema este en el estado de operación (estado 0) en el tiempo  $(t + \Delta t)$ .

$P_1(t + \Delta t)$ : Es la probabilidad de que el sistema este en el estado de falla (estado 1) en el tiempo  $(t + \Delta t)$ .

$P_i(t)$ : Es la probabilidad de que el sistema este en estado  $i$  en el tiempo  $t$ , para  $i=0,1$ .

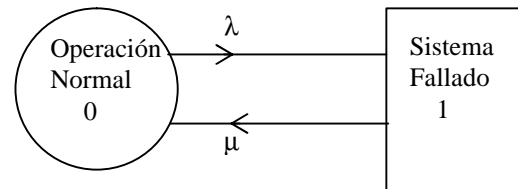


Fig.1. Sistema con dos estados:  
Operación Normal y Falla

En el límite las ecuaciones anteriores nos quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0}{dt} + \lambda P_0(t) &= P_1(t) \mu \\ \frac{dP_1}{dt} + \mu P_1(t) &= P_0(t) \lambda \end{aligned} \quad (2)$$

Y resolviendo este sistema de ecuaciones diferenciales tenemos que:

$$P_0 = \frac{m}{(1+m)} + \frac{1}{(1+m)} e^{-(1+m)t} \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{1}{(1+m)} + \frac{m}{(1+m)} e^{-(1+m)t}$$

Por lo tanto se puede comprobar que para  $t = \infty$ ;

$$P_0(\infty) = \frac{m}{1+m} + 0 \quad (4)$$

$$P_1(\infty) = \frac{1}{1+m} + 0 \quad (5)$$

$$P_0(\infty) + P_1(\infty) = \frac{m}{1+m} + \frac{1}{1+m} = 1 \quad (6)$$

A partir de estas ecuaciones se aprecia que si el número de reparaciones  $\mu \gg \lambda$  es mucho mayor que la frecuencia de falla, entonces la probabilidad de que permanezca en el estado funcional va en aumento hasta tender a 1. En la figura siguiente se muestra esa tendencia donde  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ .

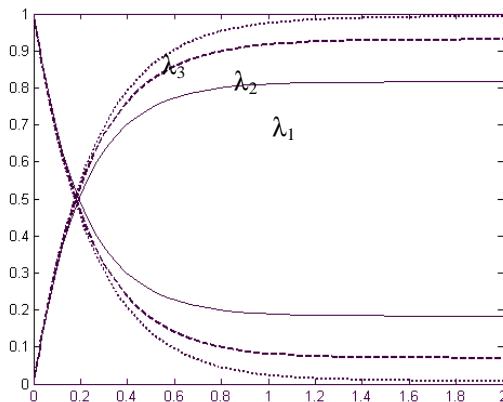


Fig. 2. Sistema de dos estados con frecuencia de fallas en disminución progresiva

### 3. RESULTADOS

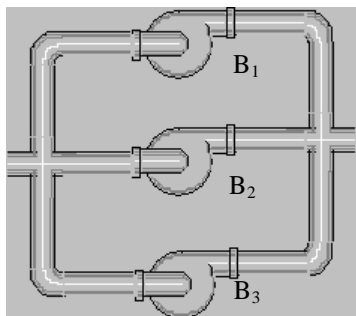


Fig. 3. Sistema de tres bombas

Para el sistema anterior se tienen los siguientes datos:

$$I_{B1} = 3 \text{ Fallas/año} \quad TTPR_{B1} = 2 \text{ Semanas}$$

$$I_{B2} = 4.1 \text{ Fallas/año} \quad TTPR_{B2} = 1.8 \text{ Semanas}$$

$$I_{B3} = 3.6 \text{ Fallas/año} \quad TTPR_{B3} = 2.3 \text{ Semanas}$$

$$I_{FALLACOMUN} = 0.5 \text{ Fallas/año}$$

$$TTPR_{FALLACOMUN} = 4 \text{ Semanas}$$

Depende del número de hombres

En este ejercicio se obtendrá:

1. Modelado del Sistema
2. Simulación Dinámica
3. Resultados Análisis Interpretación.

Obsérvese que se tienen las frecuencias de falla y reparación de cada una de las bombas y de las tres a la vez. Pero no se cuentan con datos de falla y reparación de dos bombas. Existen varios criterios para la determinación de estos datos, predominando los análisis actuariales como lo propone (Moubray, 1997). Donde se propone una metodología basada en data técnica histórica que representa el comportamiento del sistema la cual es trascrita en una planilla de ruta de falla, de donde se determinan el TPPF y el TTPR. Sin embargo en este caso no contamos con datos históricos por lo tanto se utilizara para determinar la frecuencia de falla de dos bombas a la vez el esquema de redundancia de fallas.

Tomamos el sistema de las tres bombas como un sistema paralelo, donde solo son necesarios 2 de las tres para que el sistema cumpla con 100% de su función de diseño (Tarantino, 2006). La confiabilidad de que sigan funcionando dos bombas de tres es:

$$R_{2/3} = (1 - R_1 Q_2 Q_3) + (1 - R_2 Q_1 Q_3) + (1 - R_3 Q_1 Q_2) \quad (7)$$

$$R_{(2/3)} = R_{(2,3)} + R_{(1,3)} + R_{(1,2)} \quad (8)$$

Entonces;

$$R_{(i,j)} = 1 - R_x Q_i Q_j = e^{I_{(i,j)} t} \quad (9)$$

Donde:

$R_i$ : Confiabilidad de la bomba  $i$ , evaluada como una función de distribución exponencial  $R_i = e^{I_i t}$ :

$$Q_i = 1 - R_i = 1 - e^{I_i t}$$

$R_{(i,j)}$ : Probabilidad de que sigan funcionando las bombas  $i$  y  $j$ .

A continuación en la Tabla 1 Se muestran los valores de confiabilidad  $R$  y los valores de ausencia de confiabilidad  $Q$  calculados con las ecuaciones anteriores y usados para la simulación del sistema.

**Tabla 1: Datos de Confiabilidad, TPPF y TTPR, individuales para el cálculo de los valores por pareja.**

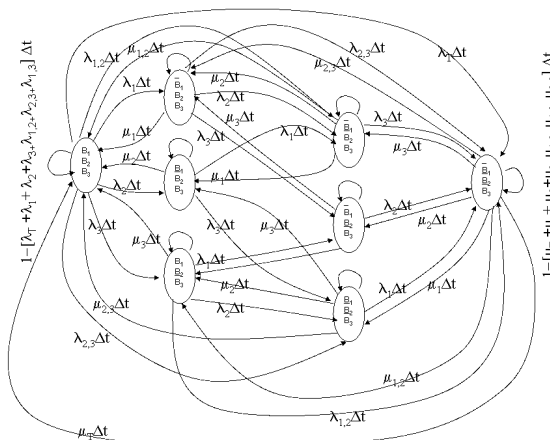
i	$\lambda$ (Fallas/año)	R	Q	$\mu$
1	3	0,05	0,95	26
2	4,1	0,02	0,98	28,88
3	3,6	0,03	0,97	22,66
T	0,5	-	-	13

A partir de la Ecuación 9, se despeja la frecuencia de falla  $I_{(i,j)}$ , en la Tabla 2 se muestran los valores calculados en cada combinación. En el caso del TTPR, para efectos de ejercicio se tomó el criterio del mayor tiempo de reparación de las dos bombas falladas, ya que como se explicó anteriormente, no se cuentan con suficientes datos.

**Tabla 2: Datos de confiabilidad, TTPR y TPPF, por pareja de bombas.**

i,j	$R_{(i,j)}$	$I_{(i,j)}$	$m_{(i,j)}$
2,3	0,952	0,049	22,6
1,3	0,985	0,015	22,6
1,2	0,974	0,026	26

El diagrama de espacio de estado resultante tomando en cuenta todas las posibles fallas se presenta en la Figura 4.



**Fig. 4: Diagrama de estado**

Hay que acotar que esta es una representación completa con todos los detalles de los posibles estados, sin embargo resulta que los detalles del sistema dependen del nivel de automatización. En este caso los detalles son muy importantes para mantenimiento y recuperación de la planta. En cambio un Gerente solo se interesa por los estados:

Funcional, Degradado y No Operativo, de tal forma que los detalles en cuanto a cuales son las bombas operativas o no, para El son irrelevantes. Lo que quiere decir que se podría presentar un diagrama de estado más simplificado o significativo, dependiendo del usuario final.

Otro método para exhibir las probabilidades de transición es usar una *matriz de transición*. La matriz de transición para el ejemplo del diagrama de estados se muestra en la tabla 3. Evaluando los datos de las Tablas 1 y 2 en la Tabla 3, se obtiene los elementos de la matriz del sistema, que aparecen en la Tabla 4.

**Tabla 3: Forma de construir la matriz de transición de estado a partir de la Cadena de Markov**

	PF	PD1	PD2	PD3	PNF1	PNF2	PNF3	PNF
PF	$-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \mu_{1,2} + \mu_{1,3} + \mu_{2,3} + \mu_{1,2,3})$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_{1,2}$	$\mu_{1,3}$	$\mu_{2,3}$	$\mu_{1,2,3}$
PD1	$\lambda_1$	$-(\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_{2,3} + \mu_1)$	0	0	$\mu_2$	$\mu_3$	0	$\mu_{2,3}$
PD2	$\lambda_2$	0	$-(\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_{1,3} + \mu_2)$	0	$\mu_1$	0	$\mu_3$	$\mu_{1,3}$
PD3	$\lambda_3$	0	0	$-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_{1,2} + \mu_3)$	0	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_{1,2}$
PNF1	$\lambda_{1,2}$	$\lambda_2$	$\lambda_1$	0	$-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_{1,2} + \mu_3)$	0	0	$\mu_3$
PNF2	$\lambda_{1,3}$	$\lambda_3$	0	$\lambda_1$	0	$-(\mu_{1,3} + \mu_1 + \lambda_2 + \mu_3)$	0	$\mu_2$
PNF3	$\lambda_{2,3}$	0	$\lambda_3$	$\lambda_2$	0	0	$-(\mu_{2,3} + \mu_2 + \lambda_1 + \mu_3)$	$\mu_1$
PNF	$\lambda_{1,2,3}$	$\lambda_{2,3}$	$\lambda_{1,3}$	$\lambda_{1,2}$	$\lambda_3$	$\lambda_2$	$\lambda_1$	$-(\mu_{1,2,3} + \mu_{2,3} + \mu_{1,3} + \mu_{1,2} + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3)$

**Tabla 4: Matriz de transición "A" de estado a partir de la Cadena de Markov**

	PF	PD1	PD2	PD3	PNF1	PNF2	PNF3	PNF
PF	-11,28 84	26	28,88	22,6	26	22,6	22,6	13
PD1	3	-33,74 8	0	0	28,88	22,66	0	22,6
PD2	4,1	0	-35,49 54	0	26	0	22,6	22,6
PD3	3,6	0	0	-29,72 5	0	26	28,88	26
PNF1	0,025	4,1	3	0	-84,4 8	0	0	22,6
PNF2	0,0154	3,6	0	3	0	-75,3 6	0	28,88
PNF3	0,048	0	3,6	4,1	0	0	-77,0 8	26
PNF	0,5	0,048	0,0154	0,025	3,6	4,1	3	-161,6 8

Estableciendo el sistema de ecuaciones diferenciales  $\dot{P} = AP$  con los datos de la tabla 4, se tiene el conjunto de ecuaciones (10) y simulando estas ecuaciones diferenciales usando para esto, la función ODE45 de Matlab®, se obtiene la solución numérica, mostradas en la graficas de la figura 5.

$$\begin{aligned}\dot{PF} &= -1,28PF + 26PD_1 + \dots + 22,6PNF_3 + 13PNF \\ \dot{PD}_1 &= 3PF - 33,74PD_1 + \dots + 22,6PNF \\ \dot{PNF} &= 0,5PF + 0,048PD_1 + \dots + 3PNF_3 - 16,168PNF\end{aligned}\quad (10)$$

#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS

Las respuestas de cada una de las variables de estado, se han agrupado como se esperaba en Funcional, Degradado y No Funcional. Al hacer un corte vertical en cualquier tiempo "t" la suma de las probabilidades de cada estado es igual a 1. Además el estado Funcional tiende a 1.

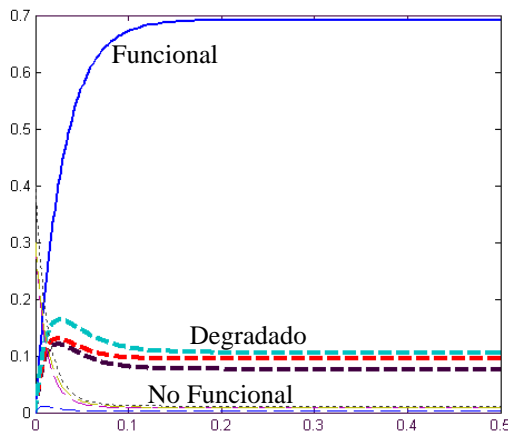


Fig.5: Simulación del espacio de estado

#### 6. CONCLUSIONES

De la Figura 2 se observa como modificando la frecuencia de falla  $\lambda$  se hace que se aumente las probabilidades de que el sistema permanezca en el estado funcional. Entonces comparando con las gráficas de la figura 5, se extraen la siguiente información: si se desea la probabilidad de Degradado basta con sumar cada una de las probabilidades de degradado así también con el estado No Funcional. Que en cualquier tiempo la suma de todas las probabilidades es la unidad. La probabilidad del estado funcional tiende a la unidad. Se observa también de las graficas que si aumenta 1 baja la probabilidad del estado funcional, esto sirve para predecir fallas, de tal manera de que se use en la

corrección, con acciones de mantenimiento preventivo. Este trabajo permite mostrar paso a paso el procedimiento para aplicar el análisis de confiabilidad con cadenas de Markov, además el programa anexo sirve de ejemplo para la ejecución de la simulación en Matlab®.

#### 5. GLOSARIO

**TPPF:** Tiempo Promedio Para Fallar  
**TPPR:** Tiempo Promedio Para Reparar

#### REFERENCIAS

- Lyman, W. J. "Fundamental consideration in preparing a master system plan". *Electrical World*, 101, 778-792, 1933.
- Smith, S. A. "Service reliability measured by probabilities of outage". *Electrical World*, 103, 371-374, 1934.
- Dhillon, B.S. *Power System Reliability, Safety and Management*. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, 1983.
- Moubray, J. *Reliability Centred Maintenance*. Butterworth Heinemann, 1997.
- Tarantino, R. *Tema 1: Confiabilidad Industrial*. Notas de clase, Postgrado UNET, 2006.

#### ANEXO A:

##### PROGRAMA EJECUTADO (EN MATLAB 5.3)

```
function dy = Markov1(t,u)
dy = [-
    11.2884*u(1)+26*u(2)+28.88*u(3)+22.6*u(4)+26*u(5)+22.6
    *u(6)+22.6*u(7)+13*u(8);
    3*u(1)-
    33.748*u(2)+0*u(3)+0*u(4)+28.88*u(5)+22.66*u(6)+0*u(7)
    +22.6*u(8);
    4.1*u(1)+0*u(2)-
    35.4954*u(3)+0*u(4)+26*u(5)+0*u(6)+22.6*u(7)+22.6*u(8)
    ;
    3.6*u(1)+0*u(2)+0*u(3)-
    29.725*u(4)+0*u(5)+26*u(6)+28.88*u(7)+26*u(8);
    0.025*u(1)+4.1*u(2)+3*u(3)+0*u(4)-
    84.48*u(5)+0*u(6)+0*u(7)+22.6*u(8);
    0.0154*u(1)+3.6*u(2)+0*u(3)+3*u(4)+0*u(5)-
    75.36*u(6)+0*u(7)+28.88*u(8);
    0.048*u(1)+0*u(2)+3.6*u(3)+4.1*u(4)+0*u(5)+0*u(6)-
    77.08*u(7)+26*u(8);

    0.5*u(1)+0.048*u(2)+0.0154*u(3)+0.025*u(4)+3.6*u(5)+4.1
    *u(6)+3*u(7)-16.168*u(8)];

[t,u]=ode45('Markov1',[0 .5],[0;0;0;0;.3;.3;.4;0]);
```



```
plot(t,u(:,1),t,u(:,2),t,u(:,3),t,u(:,4),t,u(:,5),t,u(:,6),t,u(:,7),t,u(:,8));
```

**“FLOW” A TOOL FOR ANALYSIS OF POWER FLOW AND FACTS DEVICES****“FLUJOS” UNA HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DE FLUJO DE  
POTENCIA Y DISPOSITIVOS FACTS**

**MSc. Oscar Núñez Ortega\*, MSc. Abel E. Quezada Carreón Chaparro\*\*  
Ing. Efraín Herrera Rodríguez\***

**\* Instituto Tecnológico de Cd. Juárez**, Cd. Juárez Chihuahua México  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Tel.: (+52) 656 288 2500 Ext.2623, E-mail: eca@itcj.edu.mx

**\*\* Universidad Autónoma de Ciudad Juárez**  
Departamento de Eléctrica y Computación  
Tel.: (+52) 656 688 4800 Ext.4741, E-mail: abquezad@uacj.mx

**Abstract:** This paper describes the implementation of a program called FLOW, which was developed in MATLAB and used to solve the power flow problem. In addition to the classic solution of power flow program contains the steady-state model of a FACTS device, called Static Var Compensator's. The simulator provides the flexibility to incorporate more complex models of FACTS devices and analyze their results. To test the usefulness of the simulator in this work shows a case study in which voltage problems occur and is in the Static Var Compensator's your solution.

**Resumen:** El presente trabajo describe la aplicación de un programa llamado FLUJOS, el cual se desarrollo en MATLAB y es utilizado para la solución del problema de flujos de potencia. Adicionalmente a la solución clásica de flujos de potencia el programa contiene el modelo en estado estacionario de un dispositivo FACTS, el llamado Compensador Estático de Var's. El simulador brinda la flexibilidad para incorporar modelos más complejos de dispositivos FACTS y analizar sus resultados. Para comprobar la utilidad del simulador en el presente trabajo nuestro un casos de estudio en el cual se presentan problemas de voltaje y se encuentra en el Compensador Estático de Var's su solución.

**Keywords:** Power flow, Matlab, FACTS, Static Var Compensator's (CEV).

## 1. INTRODUCCION

El simulador FLUJOS (Núñez, 2006) es un programa de simulación de sistemas eléctricos de potencia el cual está desarrollado en MATLAB. FLUJOS resuelve el problema de flujos de potencia utilizando dos métodos de solución numérica: Newton Raphson y Desacoplado Rápido, esto debido a la naturaleza no lineal del problema de flujos de potencia. FLUJOS está

diseñada con una amigable interfaz la cual le permite al usuario ingresar datos, editarlos, observar resultados en forma de texto y en forma de gráfica. Además de generar reportes que pueden ser utilizados como bases de datos para estudios de estabilidad.

Si bien es cierto que existen en el mercado una gran diversidad de simuladores que resuelven el problema de flujos de potencia, estos no tienen la

posibilidad de incorporar modelos desarrollados por los usuarios, esto limita el desarrollo científico ya que impide que nuevas tecnologías desarrolladas en centros de investigación sean probadas. Se decide utilizar el paquete de simulación MATLAB, por su gran flexibilidad en el manejo del lenguaje de programación, pero además por su gran versatilidad para permitir el manejo de funciones matemáticas.

Si bien es cierto que el Compensador Estático de Var's fue el primer dispositivo FACTS en aparecer, en la actualidad de continua utilizando ampliamente en los sistemas eléctricos de potencia del mundo, pero el real acierto de utilizar este dispositivo consiste en sentar la bases de diseño para la incorporación de dispositivos más avanzados.

## 2. ESCENARIO ACTUAL DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA Y LOS DISPOSITIVOS FACTS

La utilización de los sistemas eléctricos de potencia en la actualidad ha entrado en una etapa de cambio debido a factores como la inversión privada, el crecimiento de los sistemas debido a la demanda de suministro de energía. Esto ha obligado a que los sistemas eléctricos de potencia operen en condiciones para las cuales inicialmente no fueron diseñados.

En el escenario de los sistemas eléctricos de potencia aparece una nueva tecnología que llega para revolucionar la operación de los sistemas eléctricos de potencia. Esta tecnología es conocida como Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexibles (FACTS, *Flexible Alternating Current Transmission Systems*, por sus siglas en inglés)

En Hingonari, 1993 esta tecnología opera de forma semejante a las redes de transmisión de corriente directa las cuales involucran electrónica de potencia (Principalmente Tiristores).

Esta tecnología supera las limitaciones de los antiguos controles electromecánicos (rapidez, eficiencia, durabilidad y capacidad). El uso de las tecnologías FACTS en los sistemas eléctricos de potencia incrementa la eficiencia del sistema al considerar cinco formas de funcionamiento, estas son:

1. Aumentar el control del flujo de potencia a través de rutas de transmisión preestablecidas.

2. Incremento de la cargabilidad de las líneas de transmisión a niveles cercanos a los límites térmicos.
3. Mayor habilidad para transferir potencia eléctrica entre áreas controladas, de forma que los márgenes de generación de reserva se reduzcan de 18% a 15%.
4. Prevención de apagones en cascada al evitar los efectos de fallas y de equipos dañados.
5. Disminución de las oscilaciones, lo cual puede dañar equipo y/o limitar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica.

## 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA

El problema de flujos de potencia es la herramienta de análisis más básica que se utiliza para conocer la operación en estado estacionario de un sistema eléctrico de potencia (E. Acha, *et al.*, 2004). Es definido como el proceso de solución que proporciona los voltajes en estado estacionario en todos los nodos que conforman la red eléctrica bajo análisis y con base en los cuales se calculan los flujos de potencia activa y reactiva inyectados en terminales de cada elemento de transmisión bajo la suposición de valores conocidos de potencia generada y consumida.

La manera de obtener el punto de operación estacionario de una red eléctrica en base a un análisis de flujos de potencia es determinando que la potencia de generación, la potencia de carga y la potencia que se intercambia a través de las líneas de transmisión deben sumar cero en cada uno de los nodos de la red (esto aplica para la potencia activa y para la potencia reactiva). Esto se puede expresar matemáticamente por un grupo de ecuaciones conocidas como ecuaciones de desbalance de potencias:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - P_i = P_i^{sch} - P_i = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i = Q_i^{sch} - Q_i = 0 \quad (2)$$

Donde:

- $P_{Gi}$  y  $Q_{Gi}$  son las potencias inyectadas por el generador conectado en el nodo  $i$  de la red.
- $P_{Li}$  y  $Q_{Li}$  son las potencias extraídas por la carga conectada en el nodo  $i$  de la red.
- $P_i$  y  $Q_i$  son las potencias que fluyen a través de los elementos de transmisión y se calculan según las ecuaciones (3) y (4).

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j=1}^n V_j \left( G_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) + B_{ij} \sin(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) \right) \quad (3)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ij} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) - B_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)) \quad (4)$$

\*Los subíndices  $i, j$ . Representan los nodos de conexión del elemento de transmisión.

Debido a la evidente no linealidad de las ecuaciones (3) y (4). Un método de solución de ecuaciones no lineales es necesario para la solución del problema de flujos de potencia. Existen varios métodos entre los que destacan Gauss-Seidell, Newton-Raphson, Desacoplado Rápido, etc. El método Newton Raphson se ha utilizado como un método eficiente en cuanto a sus características de velocidad de convergencia, precisión y requerimientos de memoria (Tinney y Hart, 1967).

Para poder aplicar el método Newton Raphson es necesario tener un sistema de ecuaciones simétrico es decir, igual número de incógnitas y ecuaciones. En cada nodo de la red se especifican dos variables y en función de esas variables especificadas el nodo se clasifica según la tabla 1.

*Tabla 1. Clasificación de los nodos*

Tipo de Nodo	Variables Especificadas	Variables Calculadas
Nodo Compensador.	$V$ y $?$	$P$ y $Q$
Nodo $PV$ (Nodo Gen).	$P$ y $V$	$Q$ y $?$
Nodo $PQ$ (Nodo Carga).	$P$ y $Q$	$V$ y $?$

Una vez especificadas las variables adecuadas el problema se puede resolver. Linealizando alrededor de la condición inicial  $(P^0, Q^0)$ , los desbalances de potencias son:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} J \\ \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{q} \\ \Delta V \end{bmatrix}^k \quad (5)$$

Donde:

- $J$  se conoce como el jacobiano y contiene las derivadas parciales de las potencias activas y reactivas con respecto a las magnitudes de los voltajes y ángulos.
- $k$  representa la iteración del proceso de solución.

El método Newton Raphson es comentado ampliamente por (Tinney y Hart, 1967).

## 4. SIMULADOR FLUJOS

#### 4.1. Estructura básica del simulador FLUJOS

FLOJOS es un simulador desarrollado en lenguaje de programación en MATLAB. Este resuelve el problema de flujos de potencia utilizando dos métodos numéricos para su solución: Newton Raphson y Desacoplado Rápido. La figura 1 muestra el diagrama de flujos del simulador incluido el compensador Estático de Var's.

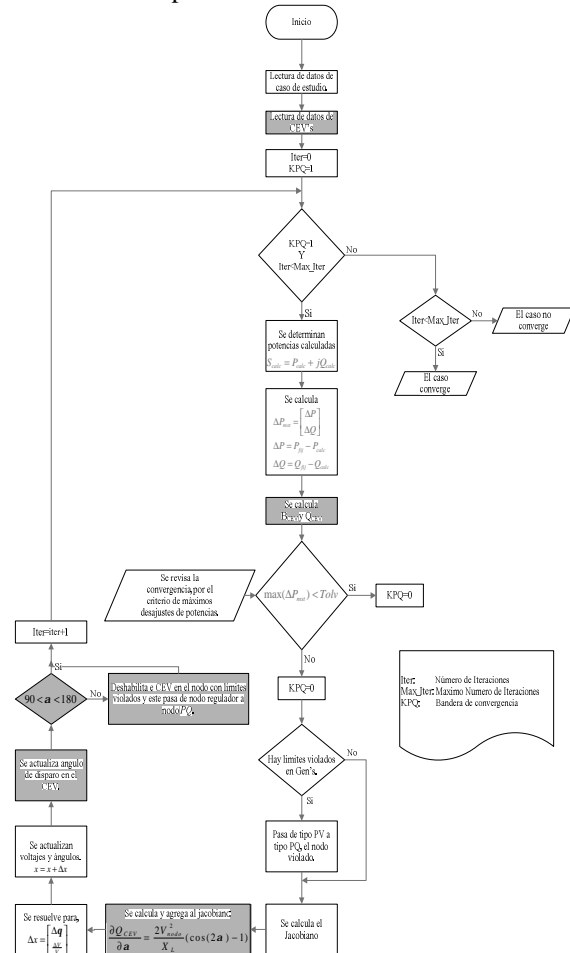


Fig. 1. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo para resolver el problema de flujos de potencia con el CEV

#### 4.2. Interfaces graficas del simulador FLUJOS

El simulador está compuesto por una serie de funciones llamadas tipo “\*.m” (MathWorks, 2000), las cuales contienen los algoritmos de solución y los algoritmos que construyen las interfaces graficas para el usuario llamadas GUI. La figura 2 muestra la ventana principal del simulador FLUJOS.

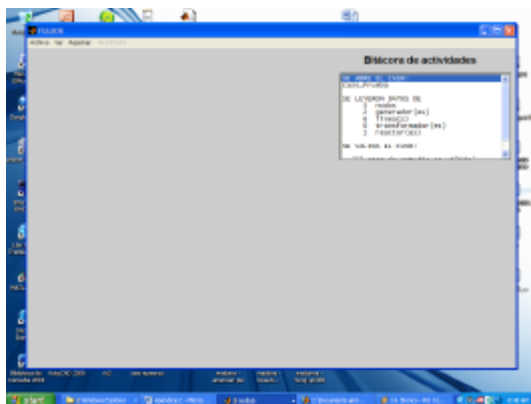


Fig. 2. Ventana principal del simulador FLUJOS, donde se aprecia la barra de menús y la ventana de bitácora de actividades

El simulador FLUJOS cuenta con la opción de ingresar datos de dos formas distintas: Directamente en la interfaz o a través de archivos binarios. Los datos que el simulador puede manejar son los siguientes: Buses de carga, Buses de generación, Líneas de Transmisión, Transformadores y Compensadores Estáticos de Var's. En la figura 3 se observa la sección de selección de datos a editar.

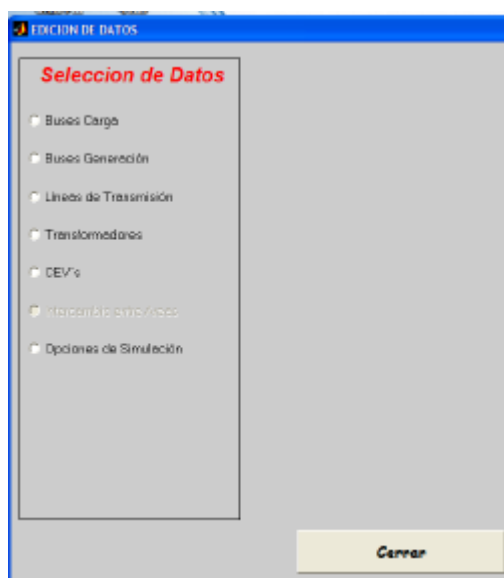


Fig. 3. Opción para seleccionar los datos a editar en el simulador FLUJOS

En la figura 4 se observa una de las ventanas de edición (nodos de carga). Y en la figura 5 la ventana de opciones de simulación donde se observa que se pueden controlar tanto el número máximo de iteraciones, los desajustes máximos de potencias activas y reactivas, la potencia base del sistema y ofrece la ventaja de arrancar las

simulaciones con perfil plano de voltaje (Acha, *et al.*, 2004).

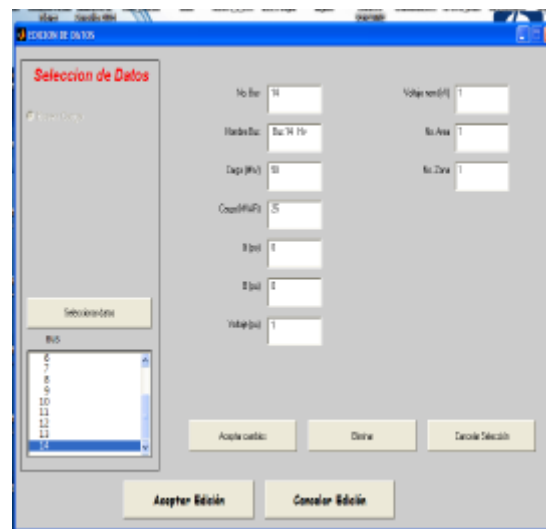


Fig. 4. Ventana de edición y captura de datos (nodos de carga)



Fig. 5. Ventana de edición y captura para las opciones de simulación

El simulador FLUJOS genera los resultados en dos formas: Gráfica y Texto. La forma gráfica consiste en una gráfica de barras en la que muestra las magnitudes de los voltajes nodales, mientras que para la forma de texto, ofrece en forma de lista las magnitudes de los voltajes nodales y sus ángulos, los flujos de potencia entre nodos y las potencias de generación y pérdidas del sistema. Las figuras 6 y 7 muestran respectivamente los resultados.

Además de mostrar de forma gráfica y texto los resultados, el simulador puede generar un reporte en formato \*.txt, el cual puede ser utilizado ya sea para estudios de estabilidad u otras aplicaciones.

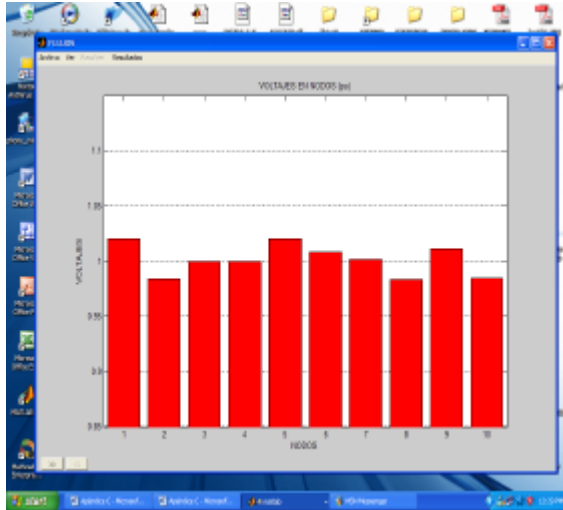


Fig. 6. Resultados gráficos generados por el simulador (Magnitudes de los voltajes nodales)

De	Nodo	1	MW	MVAR	1.0200	0.00
a	Nodo	2	48.50	23.24		
a	Nodo	7	99.32	-14.20		
a	Nodo	9	-3.63	4.77		
De	Nodo	2	MW	MVAR	0.9844	-3.31
a	Nodo	1	-48.50	-19.87		
a	Nodo	11	23.24	-0.12		
De	Nodo	3	MW	MVAR	1.0000	4.61
a	Nodo	4	10.82	-8.23		
a	Nodo	5	26.24	-19.33		
a	Nodo	10	17.47	-1.84		
a	Nodo	10	27.47	-1.84		
De	Nodo	4	MW	MVAR	1.0000	3.46
a	Nodo	3	-10.82	8.67		
a	Nodo	12	10.82	2.69		
De	Nodo	5	MW	MVAR	1.0200	0.74
a	Nodo	1	-27.47	19.37		
a	Nodo	6	0.80	10.28		
a	Nodo	14	58.79	0.20		
a	Nodo	14	58.79	0.20		
De	Nodo	6	MW	MVAR	1.0080	0.08
a	Nodo	5	-0.80	-10.04		
a	Nodo	12	0.80	10.04		
De	Nodo	7	MW	MVAR	1.0013	-11.72
a	Nodo	1	-92.86	31.35		
a	Nodo	8	4.12	15.11		
a	Nodo	13	-11.26	3.55		

Figura 7. Resultados texto generados por el simulador (Flujos de cargas)

#### 4.3. Modelo del Compensador Estático de Vars incluido en el simulador FLUJOS.

El Compensador Estático de Var's es un dispositivo regulador de voltaje el cual genera o absorbe potencia reactiva al variar la susceptancia equivalente figura 8. (Ambriz-Perez, *e. al.*, 2000) hablan detalladamente acerca de este dispositivo.

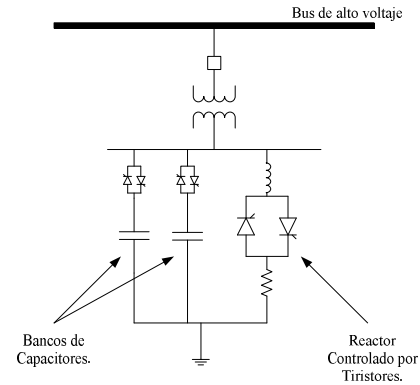


Fig. 8. Esquema típico de un Compensador Estático de Vars

En el modelo utilizado la susceptancia equivalente está en función del ángulo de disparo en los tiristores que controlan al reactor Figura 9.

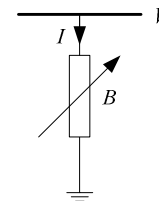


Fig. 9. Modelo de Susceptancia variable del Compensador Estático de Vars

La relación entre la susceptancia y el ángulo de disparo se expresa de la siguiente forma:

$$B = \frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \text{Sen}(2a))}{X_C \cdot X_L} \quad (6)$$

Donde:

- $B$  es la susceptancia equivalente en el Compensador Estático de Var's.
- $X_L$  y  $X_C$  son las reactancias capacitiva e inductiva total del Compensador Estático de Var's.
- $a$  es el ángulo de disparo en los tiristores que controlan al reactor

La incorporación del Compensador Estático de Var's se hace considerando el ángulo de disparo  $a$  como variable de estado. Con esto la ecuación (5) se transforma en la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q}{\partial a} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta a \end{bmatrix}^k \quad (7)$$

Donde:

- $Q = V^2 B$  (Derivada de la figura 9).
- $\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{2V^2}{X_L} (\text{Cos}(2a) - 1)$  ( $B$  de la ecuación (6)).



El voltaje en el nodo donde el Compensador Estático de Var's está conectado, siempre llegara al voltaje especificado y el Compensador Estático de Var's suministrara la potencia reactiva necesaria para este fin. Los nodos con Compensador Estático de Vars tienen tres variables especificadas ( $V, G, B$ ) y se consideran como un tipo especial de nodo con voltaje regulado. Los límites del ángulo de disparo son:  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ , si alguno de esos límites es violado el Compensador Estático de Var's se convierte en una susceptancia fija donde ahora la magnitud del voltaje nodal depende de las condiciones de la red y el nodo se convierte en un nodo  $PQ$  (ver tabla 1).

## 5. RESULTADOS

Para mostrar la utilidad del simulador FLUJOS y los excelentes resultados que ofrece, se plantea un caso de estudio el cual presenta inicialmente problemas de voltaje. Se demuestra que utilizando el Compensador Estático de Var's incluido en el simulador el voltaje se mejora notablemente.

Sistema de cinco nodos (Acha, *et al.*, 2004) mostrado en la figura 10. Sus valores iniciales se describen en las tablas 2, 3 y 4.

*Tabla 2. Voltajes y ángulos nodales del caso de estudio*

Nodo.	Voltaje (pu).	Angulo (grad).
1 (Slack <sup>1</sup> ).	1.06	0
2 (PV).	1.0	0
3 (PQ).	1.0	0
4 (PQ).	1.0	0
5 (PQ).	1.0	0

*Tabla 3. Potencias de generación y sus límites del caso de estudio*

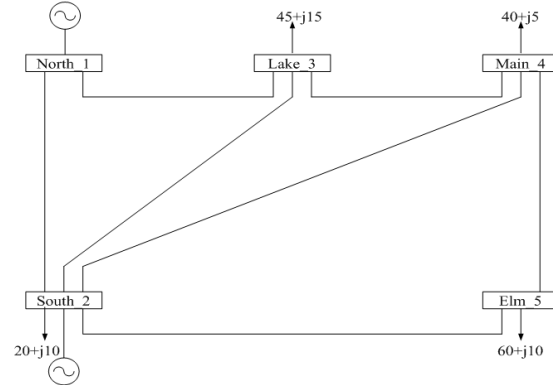
Nodo.	P (pu).	Q (pu).	Pmax (pu).	Qmin (pu).	Qmax (pu).
1	1.3112	0.9082	2.0	-2.0	2.0
2	0.4	-0.6159	2.0	-2.0	2.0

*Tabla 4. Parametros de las líneas del caso de estudio*

Nodo Inicio.	Nodo Fin.	R (pu).	X (pu).	G (pu).	B (pu).
1	2	0.02	0.06	0.0	0.06
1	3	0.08	0.24	0.0	0.05
2	3	0.06	0.18	0.0	0.04
2	4	0.06	0.18	0.0	0.04
2	5	0.04	0.12	0.0	0.03
3	4	0.01	0.03	0.0	0.02
4	5	0.08	0.24	0.0	0.05

*Tabla 5. Cargas del caso de estudio*

Nodo.	P (pu).	Q (pu).
2	0.20	0.10
3	0.45	0.14
4	0.40	0.05
5	0.60	0.10



*Fig. 10. Caso de estudio*

Se resuelve el problema de flujos de potencia para el caso de estudio y los resultados obtenidos del archivo tipo reporte generado por flujos son los siguientes:

RESULTADOS DE FLUJOS DE POTENCIA:  
SISTEMA DE 5 NODOS Bus Test Case  
FECHA: 08/14/06  
HORA: 14:12:42

### VOLTAJES Y CARGAS NODALES:

Nodo	Voltaje (pu)	Ángulo (grados)	Carga (MW)	Carga (MVAR)
1	1.0600	0.00	0.00	0.00
2	1.0000	-2.06	20.00	10.00
3	0.9873	-4.64	45.00	15.00
4	0.9841	-4.96	40.00	5.00
5	0.9717	-5.76	60.00	10.00

Se observa que el nodo 5 tiene el valor mas bajo, por tal motivo se decide poner un CEV en ese nodo. Para elevar el voltaje en ese nodo es necesario que el CEV se comporte como una susceptancia capacitiva. Los límites de la susceptancia del CEV se determinan al agregar valores de susceptancia fija al nodo de interés, con esto se llegara al valor de susceptancia que mantendrá el voltaje al valor deseado. Después de varias pruebas se determina que una susceptancia capacitiva de  $+0.32pu$  mantendrá el valor del voltaje en el nodo 5 en  $1.0pu$ . Con un valor de susceptancia requerido de  $+0.32$  (pu), los límites del CEV se establecen como:  $-5 < B < +0.5$  (pu). Con los límites de susceptancia definidos se calculan los valores de las reactancias capacitiva  $X_C$  e inductiva  $X_L$  del CEV.

El valor de  $X_C$  se calcula considerando que el ángulo de conducción es mínimo y la susceptancia total del CEV es la capacitiva. La susceptancia total del CEV es la combinación de la susceptancia capacitiva e inductiva, entonces:

$$B_C - B_L = B_{CEV} \quad (8)$$

La ecuación 8 se puede reescribir como:

$$\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} = B_{CEV} \quad (9)$$

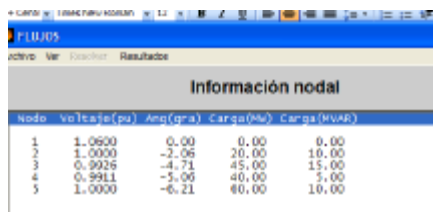
Donde:  $B_{CEV} = B_{max}$ ,  $B_{max} = +0.5(pu)$  y  $1/X_L = 0$ , entonces:  $1/X_C = 0.5(pu)$  y por lo tanto:  $X_C = 2.0(pu)$ .

El valor de  $X_L$ , se calcula con la combinación de ambas partes: capacitiva e inductiva. Partiendo de la ecuación 9, con  $X_C$  y la susceptancia total del CEV igual al valor mínimo, entonces el valor de  $X_L$  es obtenido como sigue:

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{X_L} = -0.5 \quad (10)$$

El ángulo de disparo inicial en los tiristores debe estar dentro de los límites:  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ . Un ángulo de  $100^\circ$  es recomendado para un buen arranque (Ambriz-Perez, *et.al*, 2000).

Las magnitudes de los voltajes nodales obtenidos de la corrida de flujos con el CEV, se muestran en la figura 12. El ángulo de disparo final del CEV calculado en el simulador es de  $135.13^\circ$  y la suceptaanancia final calculada por el simulador es de  $+0.3198(pu)$ . Se observa de la figura 12 que el nodo 5 tiene una magnitud de voltaje igual a  $1.0pu$ , que fue el valor especificado. Los voltajes en los nodos 3 y 4 también se incrementaron.



Información nodal					
Nodo	Voltaje(pu)	Ang(gra)	Carga(Mw)	Carga(Mvar)	
1	1.0000	0.00	0.00	0.00	
2	1.0000	-2.06	20.00	10.00	
3	0.9926	-4.71	45.00	15.00	
4	0.9911	-5.00	40.00	5.00	
5	1.0000	-6.21	40.00	10.00	

Fig. 12. Magnitudes de voltaje con el CEV agregado al nodo 5

Por último se analiza la potencia reactiva. Para este caso la potencia reactiva generada por el CEV es de 31.98 MVAR's.

Los generadores absorben una potencia reactiva total de 32.16 MVAR's. La diferencia entre estas dos potencias corresponde a la capacitancia de las líneas de transmisión.

## 6. CONCLUSIONES

El simulador FLUJOS aunque útil para resolver el problema de flujos de potencia se continúa desarrollando con el fin de incorporar más dispositivos FACTS.

En este trabajo se comprobó el beneficio del CEV en un sistema pequeño pero en pruebas más detalladas el simulador ha respondido con gran eficiencia en sistemas con más de 100 nodos.

El simulador FLUJOS continúa desarrollándose con el fin de incorporar más dispositivos FCATS, lo que ofrecerá un excelente escenario para validar diferentes modelos de dispositivos FACTS.

## REFERENCIAS

- Acha E., Forte-Esquivel Claudio R., Ambriz-Perez H., Angeles-Camacho C., "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, England 2004.
- Ambriz-Perez, H., Acha, E., Forte-Esquivel, C. R., "Advanced SVC models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No.1, Feb-2000, pp. 129-136.
- Hingonari, N. G., 1993, "Flexible AC Transmission Systems", IEEE Spectrum, pp. 41-45, Abr. 1993.
- Núñez O., Tesis: "Modelación de FACTS para estudios de flujos y estabilidad" Tecnológico de la Laguna, México 2006.
- Tinney, W. F. and Hart, C. E., 1967, "Power Solution by Newton's Method", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems PAS-86(11) 1449-1460.
- MathWorks, Inc. "Getting Started with MATLAB. Version 6". USA 2000.

**POSITION SYSTEM CONTROL FOR A PLANE SURFACE  
BASED ON FUZZY LOGIC AND ASSEMBLER LANGUAGE****SISTEMA DE CONTROL DE POSICION PARA UNA SUPERFICIE PLANA  
BASADO EN LOGICA DIFUSA Y LENGUAJE ENSAMBLADOR****MSc. Wilson Javier Pérez Holguín, Ing. María Luisa Pinto Salamanca****Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia**

Grupo de Investigación en Robótica y Automatización Industrial "GIRA"  
Escuela de Ingeniería Electrónica, Facultad Seccional Sogamoso, Colombia.  
Telefax: (8) 7-705450 Ext. 222, Calle 4S No 15-134 Sogamoso  
E-mail: wjperezh@yahoo.es, pintosml@gmail.com

**Abstract:** This paper shows the results of the analysis, design, simulation and implementation of a control strategy for the position of an object on a plane surface with two grades of freedom are presented. The control strategy mixes fuzzy logic implemented on C++ and a rules base developed in assembler language. They were carried out simulations of the SLD (Fuzzy Logical System) in Unfuzzy 1.2 and in Matlab 6.5. Also, a specially designed table was built for the verification of the operation of the real system.

**Resumen:** En este artículo se presentan los resultados del análisis, diseño, simulación e implementación de una estrategia de control para la posición de un objeto sobre una superficie plana con dos grados de libertad. La estrategia de control mezcla lógica difusa implementada sobre C++ y una base de reglas desarrollada en lenguaje ensamblador. Se realizaron simulaciones del SLD (Sistema Lógico Difuso) en Unfuzzy 1.2 y en Matlab 6.5. También, se construyó una mesa especialmente diseñada para la verificación del funcionamiento del sistema real.

**Keyword:** Assembler language, C++ Programming, Fuzzy Logic.

**1. INTRODUCCION**

En muchos sistemas se requiere controlar la posición de un objeto dentro de una zona determinada. Algunos robots de servicio, por ejemplo, deben transportar materiales sobre una superficie de carga, que deben mantenerse en una posición de referencia durante todo el trayecto, aunque el robot atraviese terrenos irregulares.

En términos generales éste podría considerarse como un problema de péndulo invertido, el cual tiene múltiples aplicaciones en sistemas robóticos y de automatización.

Como una alternativa de solución para este tipo de problemas, se desarrolló una estrategia de control que mezcla la lógica difusa y una base de reglas adicional, para controlar el funcionamiento de dos motores que trabajan como actuadores principales en la corrección de la posición de una mesa, sobre la que se dispone un objeto que debe mantenerse en una posición de referencia determinada, a pesar de ser sometido a diferentes perturbaciones.

## 2. DESCRIPCION DEL SISTEMA

Se construyó una mesa apoyada sobre una rotula central que permitiera movimientos giratorios de una superficie plana (lamina rectangular) en dos dimensiones, (Ver Figura 1).

En dos puntos de la mesa (Ver Figura 2) se dispusieron tornillos sin fin acoplados a la misma mediante pequeñas rótulas. Cada tornillo a su vez está conectado al eje de un motor para conseguir desplazamientos verticales, y de esta forma obtener un movimiento bidimensional de la superficie plana.

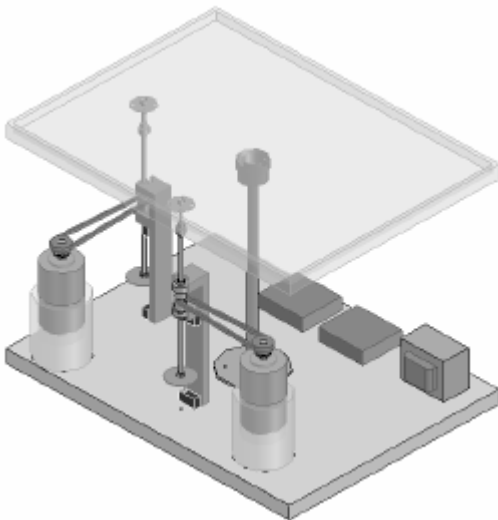


Fig. 1: Vista general del sistema

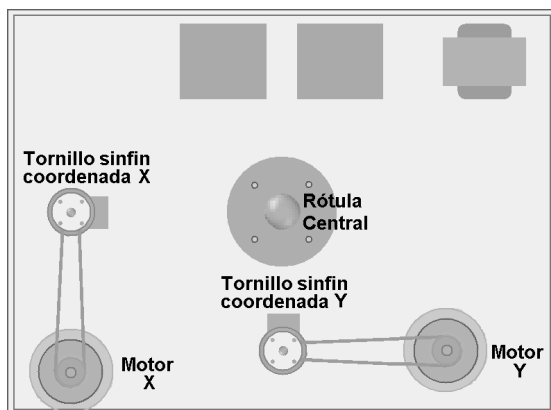


Fig. 2: Ubicación de los tornillo sinfin y los motores

Se utilizaron motores DC de 35V a 3A, gobernados por un sistema Push-pull con transistores Darlington que permite manejar su sentido de giro, conectados a un sistema electrónico que actúa como interfaz con un PC.

El objeto ubicado sobre la mesa, es un *mouse* inalámbrico-óptico, que además sirve como sensor para el sistema de control por entregar una medida de su posición directamente en coordenadas x-y. Dadas sus características ópticas, fue necesario adecuar la superficie para permitir su desplazamiento.

Se emplearon fines de curso para indicar cuando ocurre el máximo desplazamiento de los tornillos y así proteger los motores. En la base de la mesa se ubicaron las tarjetas de control y la fuente de alimentación del sistema.

## 3. ESTRATEGIA DE CONTROL EMPLEADA

La estrategia de control mezcla lógica difusa implementada sobre C++ y una base de reglas desarrollada en lenguaje ensamblador.

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que le permite a un computador analizar información del mundo real en una escala entre falso y verdadero. Cuando se carece de algoritmos que dictan cómo responde un sistema ante ciertas entradas, la lógica difusa puede controlar o describir un sistema usando reglas de sentido común que se refieren a cantidades indefinidas.

Los sistemas lógicos difusos usan la experiencia de las personas que normalmente interactúan con el sistema que se desea controlar (expertos) para formar un conjunto de reglas difusas. El valor medido en el sistema es convertido en un número difuso por medio de un difusor. Se definen los grados de pertenencia de éste número a varios conjuntos difusos de entrada. Mediante un motor de inferencia se establece el grado de pertenencia a un grupo de conjuntos difusos de salida. A través de un congresor se establece el valor real de salida que actuará como señal de control para la planta. En la figura 3 se observa la estructura general de un SLD.

En este caso, se ha implementado un SLD para determinar el tiempo de energización de cada uno de los motores de acuerdo con la distancia a la que se encuentre el objeto de su posición de referencia. Adicionalmente, se implementó un algoritmo en lenguaje ensamblador que permite el manejo de la interface de entrada/salida del sistema y la determinación del cuadrante en el que se encuentra el objeto a controlar.

La señal de retroalimentación, correspondiente a la coordenada x-y reportada por el *mouse*. Esta información ingresa al sistema mediante el uso de las instrucciones de llamada de funciones de la interrupción 33H, cuando la interfaz de usuario se realiza exclusivamente en lenguaje ensamblador, o mediante la edición del evento *OnMouseMove* del Formulario cuando la interfaz se hace en lenguaje C, sobre Builder C++ 6.0.

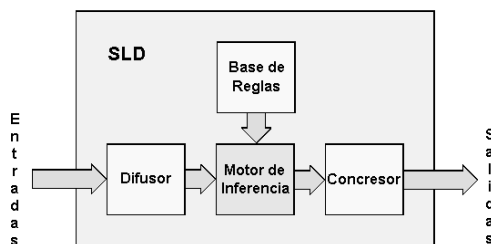


Fig. 3: Estructura general de un SLD

A partir de los datos correspondientes a la posición del *mouse* se identifica la zona en la que se encuentra. De esta forma se puede establecer si está en la región considerada como centro, cerca o lejos, y el cuadrante donde está ubicado. En la figura 4 se ilustra las zonas de trabajo definidas, sobre la mesa de prueba –superficie plana–, durante el desarrollo del proyecto.

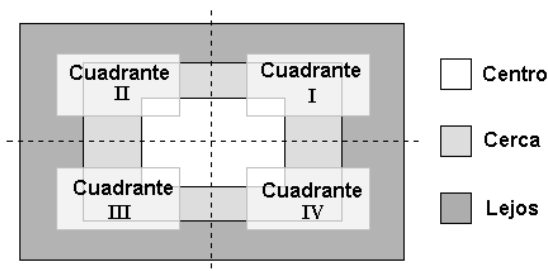


Fig. 4: Definición de regiones de trabajo

### 3.1 Sistema de Lógica Difusa

El SLD genera dos salidas que son empleadas para determinar el tiempo de encendido de cada uno de los motores, de acuerdo con la información de la posición en la que se encuentre el *mouse*.

Se definieron dos variables de entrada correspondientes a la posición *x* (denominada CoordenadaX) y a la posición *y* (denominada CoordenadaY), y dos de salida que indican el tiempo de energización de cada motor (Designadas en el SLD como EnergizaMotor X y EnergizaMotor Y).

Los conjuntos de entrada son mostrados en la figura 5. Se emplearon cinco conjuntos tipo triángulo que representan a las zonas LejosNegativo, CercaNegativo, Centro, CercaPositivo y LejosPositivo.

Los conjuntos de salida que simbolizan la energización de los motores son Poco, Medio y Alto. Estos también son tipo triángulo y se observan en la figura 6.

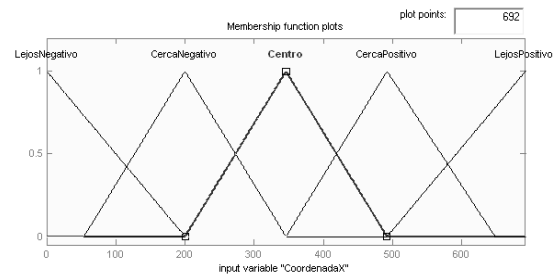


Fig. 5: Conjuntos de entrada para el SLD.

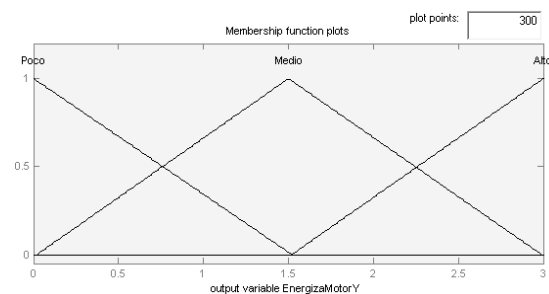


Fig. 6: Conjuntos de salida para el SLD

La superficie difusa muestra la relación entre las entradas, las salidas y la base de reglas definidas en el SLD (Ver figura 7).

Obsérvese como la superficie difusa correspondiente a la energización del motor X está desfasada 90° respecto a la del motor Y, ambas mantienen la misma forma de “V” que indica una convergencia total del sistema hacia la zona centro.

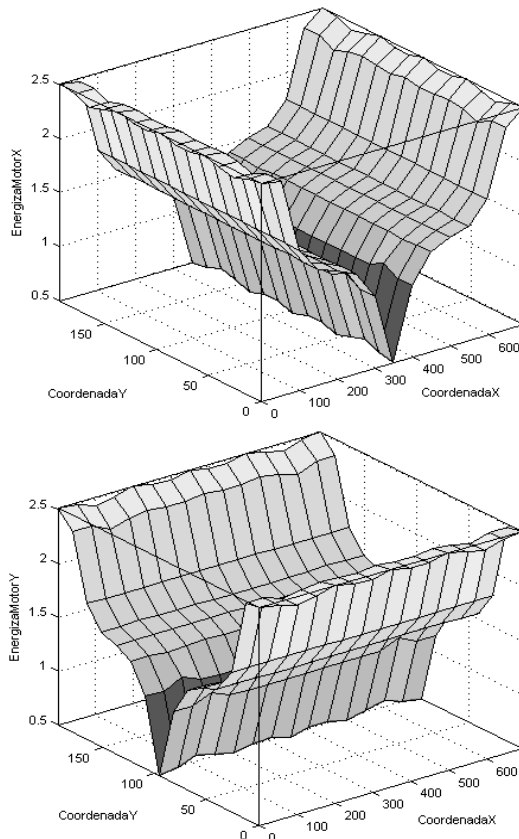
El Sistema de Lógica Difusa fue desarrollado con los siguientes parámetros: inferencia tipo *Mandani*, método AND *Mínimo*, método OR *Máximo*, fusificador *Singleton*, defusificador *Centroid*, implicación *Mínimo*, agregación *Máximo* y una base de 25 reglas (Ver Tabla 1).

**Tabla 1: Tiempo de energización de los motores**

Motor X Motor Y		Coordenada Y				
		Lejos Negativo	Cerca Negativo	Centro	Cerca Positivo	Lejos Positivo
Coordenada X	Lejos Negativo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
	Cerca Negativo	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
	Centro	Poco	Poco	Poco	Poco	Poco
	Cerca Positivo	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
	Lejos Positivo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

La simulación, análisis y sintonización del sistema se hizo mediante la herramienta Fuzzy del Matlab 6.5, y el controlador en C++ se generó empleando Unfuzzy 1.2. Por último, en Builder C++ se vinculó el código de C++ obtenido con Unfuzzy con la interface usuario y el código assembler que comanda los motores. El código resultante es demasiado extenso, razón por la cual no se incluye en este artículo.

### 3.2 Algoritmo de Control en Ensamblador

**Fig. 7: Base de Reglas y Superficies Difusas**

El algoritmo en ensamblador establece la secuencia de encendido de los motores y su sentido de giro. Esto se logra a partir de la coordenada (x,y) sensada a través del *mouse*, la cual permite determinar en que cuadrante se encuentra y, por lo tanto, cuales motores deben activarse. Ya que aquí solo se genera la orden de activación para cada motor y el sentido de giro, es el algoritmo difuso quien determina durante cuanto tiempo debe permanecer cada uno en este estado.

Como circuito de interfaz electrónica entre la planta (mesa) y el computador, se empleó un circuito PPI (interfaz periférica programable) configurado mediante el lenguaje ensamblador. A través del puerto B de la PPI en modo salida se manejaron tres señales para cada uno de los motores, correspondientes a energización y sentido de giro (encendido o apagado y derecha o izquierda).

La PPI está conectada al puerto paralelo del computador LPT1, empleando la dirección 0378H para datos y la 037AH para control. Debido a que en este puerto no existen líneas de control de lectura y escritura ( $\overline{RD}$  y  $\overline{WR}$ ), las mismas deben generarse junto con las líneas A0 y A1 (selectores de registros) dentro del programa y ser enviadas a través del puerto 037AH. Debe prestarse atención al estado lógico de estas líneas, dado que algunas de ellas son de lógica negada ( $\overline{C3}$ ,  $C2$ ,  $\overline{C1}$ ,  $\overline{C0}$ ).

La figura 8 muestra la ventana de la interfaz de usuario diseñada en Builder C++. Sobre el *mouse* se observa la lectura de posición x-y y en la izquierda de la ventana se muestra el dato de tiempo de energización de los motores necesario para llevar el mouse a la zona centro. La energización del motor se encuentra en un intervalo de tiempo entre 0s y 3s. Este último corresponde al tiempo que demora el tornillo en realizar su máximo desplazamiento. La ventana de interfaz también incluye botones para inicializar y detener el control, generar un listado de datos e inicializar la PPI.



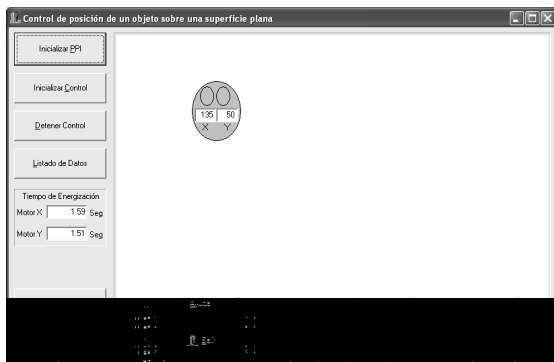


Fig. 8: Ventana de Interfase con el Usuario

## 6. CONCLUSIONES

Este proyecto demuestra la viabilidad de combinar estrategias de control de naturaleza diferente como lo son un Sistema de Lógica Difusa SLD, con un programa en lenguaje ensamblador. El primero contiene la dinámica del modelo del sistema y el segundo establece la secuencia de encendido de los motores y su sentido de giro.

El diseño de interfaces de usuario con Builder C++ y lenguaje ensamblador resulta altamente eficiente para el manejo de dispositivos entrada salida en bajo nivel, ya que evita el uso de librerías especiales de interfaz I/O diseñadas para C++. La idea es obtener un ambiente gráfico amigable y atractivo para el usuario, el cual se desarrolla de forma fácil y rápida en Builder C++, y confiar el manejo de señales de bajo nivel al lenguaje ensamblador, que se desenvuelve de manera excelente para este tipo de aplicaciones.

Teniendo en cuenta que la señal de activación de cada motor es ON-OFF, fue necesario definir una señal de control que considerara la posición inicial del cursor en la mesa y las acciones a realizar de acuerdo con la nueva posición a alcanzar. Esta señal de control se relaciona con el tiempo de aplicación de una señal de activación a cada motor, y la especificación de su sentido de giro, mediante el uso de la PPI.

El tipo de difusor, congresor, método de inferencia, implicación, AND, OR, agregación y el grado de certeza que se tiene sobre cada regla en el SLD, determinan el correcto funcionamiento del sistema de control, y su escogencia está estrechamente relacionada con las características del sistema a controlar.

El número y tipo de conjuntos de entrada y salida, debe escogerse de forma adecuada para que se modele en ellos la dinámica propia del sistema que se desea controlar. Los resultados son significativamente diferentes si se emplean otros tipos de conjuntos o si se distribuyen de forma diferente a la planteada.

## REFERENCIAS

- Delgado, A. *Inteligencia Artificial y mini-robots*. Bogotá: ECOE Ediciones, 1998.
- Corzo, J. *La Lógica Difusa*.  
<http://personales.ya.com/casanchi/mat/difusa01.htm> 13 de Junio de 2006.
- Galindo G. J. *Lógica Difusa y Aplicaciones: Conjuntos y Sistemas Difusos*. Departamento de lenguajes y Ciencias de la Computación. Universidad de Málaga.  
<http://www.lcc.uma.es/~ppgg/FSS/FSS1.pdf>. 10 de Junio de 2006.
- Jang, J.-S.R., Sun, C.-T. and Mizutani, E. *Neuro – Fuzzy an Soft computing*. Prentice Hall.
- Pérez H. G. *Sistemas de Lógica Difusa*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, 2001.

**FUZZY IDENTIFICATION AND PARALLEL DISTRIBUTED  
COMPENSATION FOR CRUISE FLIGHT PHASE OF A BLIMP****IDENTIFICACION DIFUSA Y COMPENSACION PARALLELA DISTRIBUIDA  
PARA FASE DE VUELO CRUCERO DE UN DIRIGIBLE**

**Ing. Erik Díaz, PhD. Leonardo E. Solaque Guzmán, PhD. Alain Gauthier Sellier**

**Universidad de Los Andes**  
Carrera 1 N° 18A 10, Bogotá, Colombia  
Tel: +57(1) 339 9999 - 339 4949  
E-mail: {eri-diaz, l-solaqu, agauthie}@uniandes.edu.co

**Abstract:** The goal of this paper is to present some results of the study of fuzzy techniques for identification and control of non linear systems, applied on a blimp during the phase of cruise flight. This work intends to contribute to the UrAn project developed by the GIAP group of the University of Los Andes, whose objective is the autonomous flight of this aerial platform. To find a good representation of the system, we use Takagi-Sugeno (TS) fuzzy identification where the dynamics of the blimp are represented in groups of if-then rules, each rule having a linear model corresponding to a local dynamic. Using this fuzzy model structure, it was design a controller based on the Parallel Distributed Compensation (PDC) technique.

**Resumen:** El objetivo de este trabajo es presentar resultados del estudio de las técnicas difusas para la identificación y control de sistemas no lineales, aplicados en un dirigible durante la fase de vuelo crucero. Este trabajo se propone contribuir al proyecto UrAn desarrollado por el grupo GIAP de la Universidad de Los Andes, cuyo objetivo es el vuelo autónomo de esta plataforma aérea. Para encontrar una buena representación del sistema, se utiliza la identificación difusa Takagi-Sugeno (TS) donde la dinámica de los dirigibles están representados en los grupos de reglas si-entonces, cada regla tiene un modelo lineal que corresponde a una dinámica local. Usando este modelo de estructura difusa, se diseña un regulador basado en la técnica de compensación paralela distribuida.

**Keyword:** Blimp, fuzzy identification, Parallel distributed compensation, TS fuzzy model

## 1. INTRODUCTION

Blimps are aerial platforms with multiple applications in areas like: cartography, security and environmental protection. Some works had been developed to model and design controls for this type of platforms. Among them, we find the doctoral thesis [1], developed at LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture de Systemes) in France.

In this thesis, the author proposes a model, product of a mechanical and aerodynamic analysis of blimp known as KARMA, and a control using backstepping technique. At the University of Los Andes, several undergraduate projects have been done based on KARMA results [2, 3]. In 2002 the GIAP control group began the UrAn project which objective is to achieve the autonomous flight of this type of airship.

In this paper we present another approach to model and control a blimp, using fuzzy techniques. In the first part of this article we describe the identification method used to model the airship's dynamic. Then, we present the results of control design, using PDC technique, applied on a Simulink® model of KARMA.

## 2. IDENTIFICATION PROCESS

Because of the complexity of the system [1-6], different works represent the blimp's dynamic through linear models. Following this approach, Takagi-Sugeno (TS) fuzzy identification represents a good alternative to handle nonlinear systems [7]. The idea of this type of identification is to model a system by if-then rules and linear models (consequents of rules) representing local dynamics.

The general form of TS fuzzy model is:

$R_i$ : if  $x_1$  is  $A_{i1}$  and  $x_2$  is  $A_{i2}$  and.....and  $x_p$  is  $A_{ip}$   
then  $y_i = f_i(\mathbf{x})$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Fuzzy models are constructed thanks to fuzzy clustering, which is basically a classification of objects according to similarities among them [7,8].

### 1.1. Phases of flight

Taking into account the complexity and non linear behavior of the system, a method to treat the problem was proposed by [1-3]. Under some specific conditions of operation, we can reduce the problem into less complex models, by identifying three phases of flight:

- ? Takeoff: The airship rises up reaching the desired altitude.
- ? Cruise: The airship reaches an aerodynamic speed and moves in a horizontal plane.
- ? Landing: The airship descends to a secure altitude where it starts to slow down.

### 1.2. Identification method for cruise flight

In a cruise flight, there are three input variables that we must control: thrust generated by motors ( $T$ ), angle for rotations ( $\mathbf{d}_g$ ) and elevation angle ( $\mathbf{d}_e$ ). The vectored thruster remains constant at zero. To simplify identification of blimp during cruise flight, we decide to work with a decoupled model with three SISO (single input single output) systems, following the procedure in [1, 10]:

- Propulsion system (Input - torque, Output - airspeed)
- Horizontal flight: Motion in horizontal plane with constant airspeed (Input - angle for rotations, Output - yaw angle)
- Vertical flight: Motion in vertical plane with constant airspeed (Input - elevation angle, Output - altitude)

For each of these systems, a fuzzy model is obtained using the TS fuzzy identification. We use a simulink model of blimp's dynamic with KARMA's physical parameters (dimensions, weight) to acquire input-output data. The toolbox FMID (Fuzzy modeling and identification) developed by Robert Babuska [6], contains the Gustaffson-Kessel algorithm for fuzzy clustering and computes the parameters of TS fuzzy models.

Before running FMID toolbox, we must fix some parameters: number of clusters ( $c$ ), fuzziness of clusters ( $m$ ), sample time ( $T_m$ ), number of delays in output ( $n_y$ ), number of delays in input ( $n_u$ ) and number of transport delays ( $n_d$ ). Fuzzy model is validated with a function in toolbox that computes the percentile variance accounted (VAF) between two signals. Figures 1, 2 and 3 show the membership functions of different fuzzy models.

In vertical and horizontal flights we decide to identify dynamics indirectly defining new output signals.

For vertical flight, a new output signal is calculated using the following variable:

$$\Delta Z(k) = Z(k) - Z(k-1) \quad (1)$$

For horizontal flight, a new output signal is calculated using the following variable:

$$\Delta \mathbf{y}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{y}(k-1) \quad (2)$$

The input signal chosen to guarantee proper excitation of the system, in three cases, is a step wise signal with random amplitude and random width.

### 1.3. Propulsion system

Parameters of identification are:

$c = 2$ ,  $m = 2.5$ ,  $n_y = 2$ ,  $n_u = 1$ ,  $n_d = 1$ ,  $T_m = 0.5s$ .  
Validation result: VAF = 99.7290

TS fuzzy model is:

1. If  $V_a(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $V_a(k-2)$  is  $A_{12}$  and  $T(k-1)$  is  $A_{13}$  then  $V_a(k) = 1.01V_a(k-1) - 0.06V_a(k-2) + 0.02T(k-1) + 0.07$
2. If  $V_a(k-1)$  is  $A_{21}$  and  $V_a(k-2)$  is  $A_{22}$  and  $T(k-1)$  is  $A_{23}$  then  $V_a(k) = 0.91V_a(k-1) - 0.01V_a(k-2) + 0.02T(k-1) + 0.05$

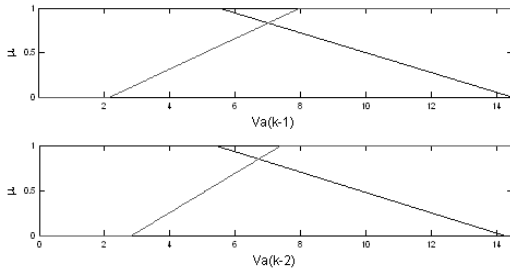


Fig. 1: Membership functions of fuzzy propulsion model

#### 1.4. Vertical flight

Parameters of identification are:

$c = 2$ ,  $m = 2$ ,  $ny = 1$ ,  $nu = 1$ ,  $nd = 1$ ,  $Tm = 0.5s$ .  
Validation result: VAF = 98.1780

TS fuzzy model is:

1. If  $\Delta Z(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $d_e(k-1)$  is  $A_{12}$  then  $\Delta Z(k) = 9.61 \cdot 10^{-1} \Delta Z(k-1) + 1.02 \cdot 10^{-3} d_e(k-1) + 2.32 \cdot 10^{-2}$
2. If  $\Delta Z(k-1)$  is  $A_{21}$  and  $d_e(k-2)$  is  $A_{22}$  then  $\Delta Z(k) = 9.70 \cdot 10^{-1} \Delta Z(k-1) + 6.18 \cdot 10^{-4} d_e(k-1) + 1.14 \cdot 10^{-2}$

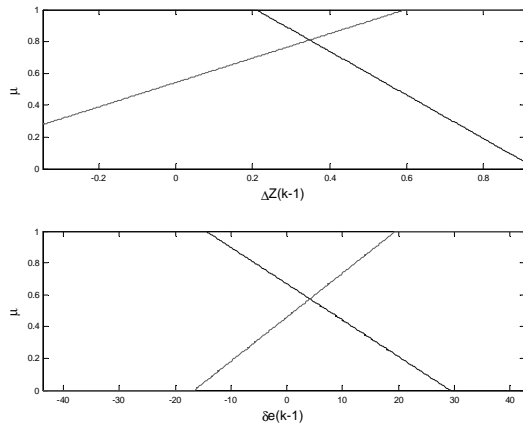


Fig. 2: Membership functions of fuzzy vertical flight model

General form of linear models is:

$$\Delta Z(k) = a\Delta Z(k-1) + bu(k-1) + c \quad (3)$$

Using expression  $\Delta Z(k) = Z(k) - Z(k-1)$ , we find a new difference equation with  $Z(k)$  for each rule.

$$Z(k) = (1+a)Z(k-1) - aZ(k-2) + bu(k-1) + c \quad (4)$$

#### 1.5. Horizontal flight

Parameters of identification are:

$c = 2$ ,  $m = 2$ ,  $ny = 2$ ,  $nu = 1$ ,  $nd = 1$ ,  $Tm = 0.5s$ .  
VAF = 97.32

TS fuzzy model is:

1. If  $\Delta y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $\Delta y(k-2)$  is  $A_{12}$  and  $d_g(k-1)$  is  $A_{13}$  then  $\Delta y(k) = 1.57\Delta y(k-1) - 0.59\Delta y(k-2) - 0.02d_g(k-1) + 0.08$
2. If  $\Delta y(k-1)$  is  $A_{21}$  and  $\Delta y(k-2)$  is  $A_{22}$  and  $d_g(k-1)$  is  $A_{23}$  then  $\Delta y(k) = 1.65\Delta y(k-1) - 0.67\Delta y(k-2) - 0.01d_g(k-1) - 0.03$

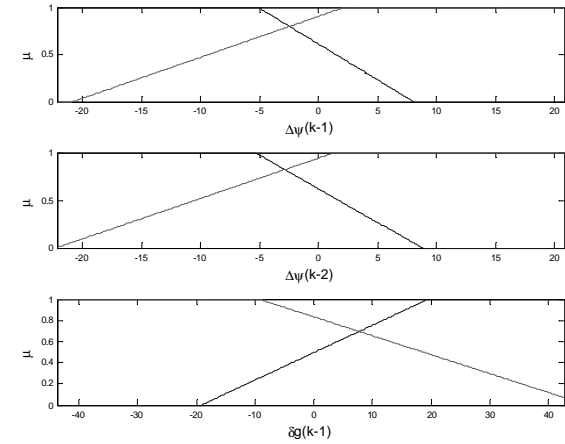


Fig. 3: Membership functions of fuzzy horizontal flight model

$$\Delta y(k) = a\Delta y(k-1) + b\Delta y(k-2) + cu(k-1) + d \quad (5)$$

Using expression  $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$ , we find a new difference equation with  $y(k)$  for each rule.

$$y(k) = (1+a)y(k-1) + (b-a)y(k-2) - by(k-3) + cu(k-1) + d \quad (6)$$

### 3. CONTROL DESIGN

From TS fuzzy identification, we get a fuzzy model. It describes the behavior of the system, through a group of if-then rules, whose consequents are linear models corresponding to local dynamics.

Based on this structure, Parallel Distributed Compensation technique [9] suggests designing a new TS fuzzy model with the same rules (fuzzy sets, variables of antecedents). Consequents of this new fuzzy model are regulators. For each linear model a regulator is designed.

After the identification process we have a group of fuzzy models representing blimp's dynamic during cruise flight.

The next step is to design a group of controllers able to provide stability and guarantee linear tracking. In each case we propose a PDC controller, using the rule base of corresponding fuzzy model and designing a controller for each linear model.

In this work we tried three approaches in compensator's design: pole placement, algebraic compensator and fuzzy optimal control design.

In pole placement and algebraic compensator we design controllers based on linear model without affine term. These approaches are valid if we consider affine terms small comparing to the output values. The last approach looks to minimize the following criterion:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k) \quad (7)$$

Where  $x_k$  is a state vector and  $u_k$  is an input vector. Fuzzy optimal controller includes affine terms in design process [11].

After many essays, pole placement design provided us the best control behavior. Thus, rule's consequents, which are difference equations, must be transformed into state space representation. Since states are measurable delayed output variables, there is no need for an observer. Consequents of rules in new fuzzy models are implemented using a structure which includes state feedback and integrator.

We look for general stable behavior, designing controllers which allow slow closed-loop dynamic. For each controller, poles of the closed loop-system are placed near to the unit circle of stability region in the z-plane.

The blimp must reach a minimum constant airspeed to flight, then must maintain a constant altitude and finally it moves in a horizontal plane. Following these steps, we validated controllers in the simulation without wind using a Simulink® model of KARMA (see figures 4, 5, 6).

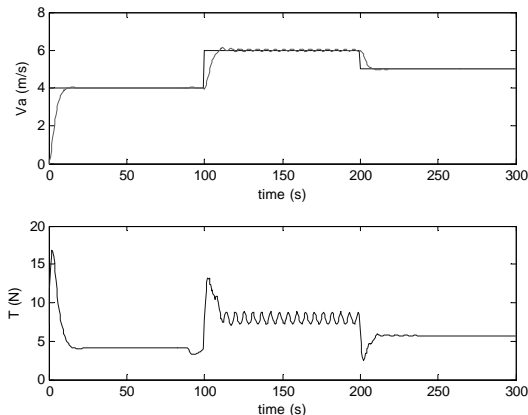


Fig. 4: Airspeed

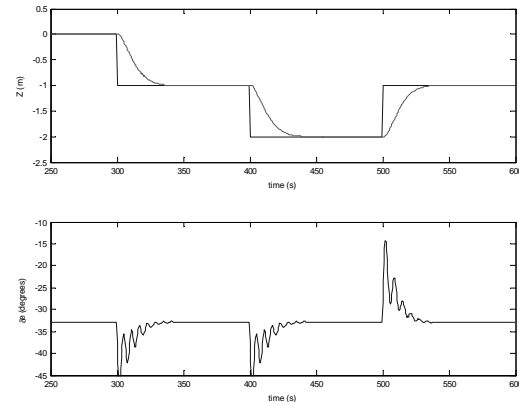


Fig. 5: Altitude

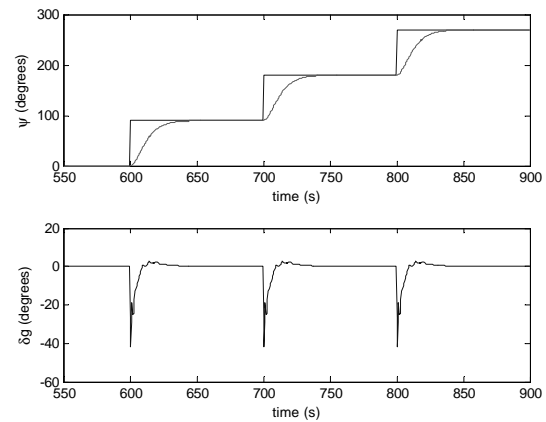


Fig. 6: Horizontal motion

Performance of controllers must assure conditions of cruise flight despite changes in system's dynamic because of disturbances caused by wind and additional mass.

A second simulation validated compensators with a constant wind blowing from the south at 2 m/s and an additional mass of 0.1kg (see figures 7, 8, 9).

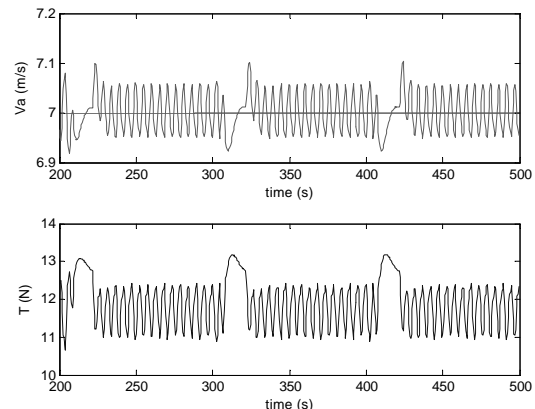


Fig. 7: Airspeed

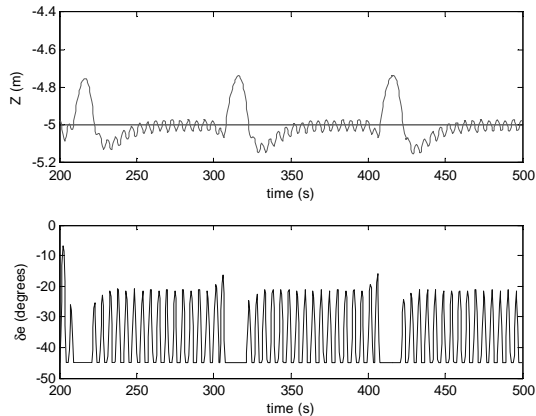


Fig. 8: Altitude

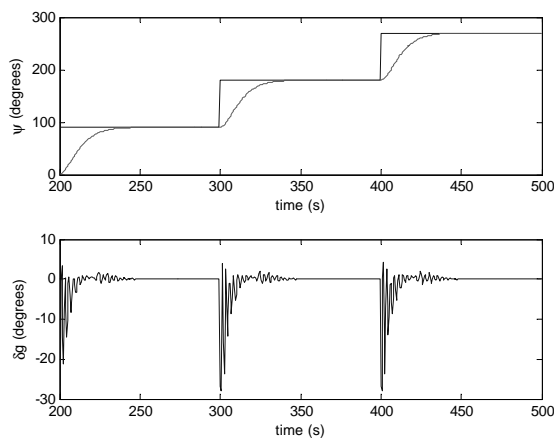


Fig. 9: Horizontal motion

## 6. CONCLUSIONS

Following the procedure proposed in [1], we simplify the identification problem looking for three less complex models which represent blimp's dynamic during cruise flight. From input-output data and using FMID toolbox we obtain three fuzzy models with excellent validation results. PDC technique allows us to use fuzzy model structure to create fuzzy controllers.

Thanks to pole placement design, we obtain consequents of rules for each fuzzy controller. Simulation with ideal conditions (no wind, no additional mass), shows us a good performance of control. A second simulation tests the behaviour of the controllers under disturbances (wind and additional mass). Control signals are stronger than those in ideal conditions, but controllers are still able to provide stability and eliminate steady-state error. Therefore, these fuzzy controllers are robust. TS fuzzy identification and division of blimp's dynamic during cruise flight in three subsystems, demonstrate to be a good method of modelling the

airship. From these models and using PDC theory, a strategy of control has been developed and tested in simulation with good results.

The next step in this project is to model and control a real aerial platform (UrAn) using these fuzzy techniques and data from test flights.

## REFERENCES

- [1] E. Hygounenc. *Modélisation et commande d'un dirigeable pour le vol autonome*. Thèse, Rapport LAAS No 03502, 2003.
- [2] A. Arévalo. *Modelaje, identificación y simulación del sistema de vuelo de un dirigible*. Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, 2003.
- [3] C. Patiño. *Diseño de un sistema de control de vuelo de un blimp*. Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2005.
- [4] S. Varella and J. Ramos. *Airship Modeling for Autonomous Operation*, International Conference on Robotics and Automation, May, 1998.
- [5] E. Carneiro and S. Bueno. *Influence of Wind Speed on Airship Dynamics*, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 25, No. 6, November-December 2002.
- [6] L. Solaque, A. Gauthier and S. Lacroix, *Modelamiento y Control de un Dirigible*, 2004.
- [7] R. Babuska. *Fuzzy Modeling for Control*, Kluwer Academic Publishers: Massachusetts, USA, 1998.
- [8] H. Grisales. *Identificación por clustering y perspectivas de control LMI para sistemas no lineales difusos Takagi – Sugeno*. Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, 2002.
- [9] K. Tanaka, O. Wang. "Fuzzy control systems design and analysis: a Linear Matrix Inequality Approach". Jhon Wiley and Sons, 2001.
- [10] L. Solaque, A. Gauthier and S. Lacroix. *Planificación de la trayectoria de vuelo para un dirigible en el plano horizontal*, Colombian Workshop on Robotics and Automation, August 2005.
- [11] H. Grisales. *Fuzzy Optimal Design for Discret Affine Takagi-Sugeno Fuzzy Models: application to a biotechnological process*, 2006.



**NORMAS PARA PUBLICAR ARTICULOS**

Para publicar artículos científicos y tecnológicos en las secciones de la revista, debe de enviarlo por medio de correo electrónico de acuerdo con las normas de publicación en formato IFAC que se encuentran disponibles en:

[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/04082009/publi\\_revistas.jsp](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/04082009/publi_revistas.jsp)

(**Formato IFAC**). Como máximo 8 páginas (10 con justificación) el trabajo a presentar. Los artículos deben de enviarse también a:

[rcta@unipamplona.edu.co](mailto:rcta@unipamplona.edu.co)

Nuestro comité editorial le comunicará el estado de su artículo y las observaciones del grupo de revisores para su publicación.

**AREAS TEMATICAS DE PUBLICACION**

- Telecomunicaciones.
- Control y automatización.
- Mecatrónica.
- Investigación de operaciones.
- Inteligencia artificial y robótica.
- Electrónica de potencia.
- Dispositivos y circuitos electrónicos.
- Procesamiento digital de señales.
- Microelectrónica.
- Bioingeniería.
- Ingeniería de software y simulación.
- Ingeniería Eléctrica.
- Sistemas y Gestión informática.
- Tecnologías Educativas.
- TIC's.



# Cupón de suscripción

## *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*

ISSN: 1692 - 7257

Suscripción y Factura: \_\_\_\_\_

Dirección de envío: \_\_\_\_\_

País: \_\_\_\_\_

Valor de la suscripción (2 números) - \$ 30.000

Al exterior USD ----- \$ 30.00 USD

Consignar a la Universidad de Pamplona

Banco Bogotá: Cta. No. 46294676 - 4

Banco Popular: Cta. No. 72072061 - 4

### CORRESPONDENCIA, CANJE Y SUSCRIPCIONES

Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas  
Ciudadela Universitaria, Pamplona. Norte de Santander. Colombia.  
Teléfonos: (+57) 7568 5303, Ext.: 241, 156.