

## TECHNOLOGY INTEGRATION IN AN AUTOMATIC WITH ORTHOGONAL MOVEMENT. A PROPOSAL FOR A COMPARATIVE STUDY OF THE CINEMATIC BEHAVIOR

### INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS EN UN AUTOMATISMO CON MOVIMIENTOS ORTOGONALES. UNA PROPUESTA PARA ESTUDIO COMPARATIVO DE SU COMPORTAMIENTO CINEMÁTICO

Ing. Miguel Angel Reyes Orozco, MSc. Emil Hernández

Universidad Pontificia Bolivariana, Sede Bucaramanga

Facultad de Ingeniería Mecánica, Tel.: 57-7-6796220, Fax: 57-7-6796221, Ext. 620

E-mail: miguel.reyes@upb.edu.co, emil.hernandez@upb.edu.co

**Abstract:** This paper presents a first phase of development of a didactic device of orthogonal movements. Using the latest technology in components to generate and control movements in three axes, required to simulate an industrial Flexible Cell. The second phase will involve proposing and developing the comparison of the dynamic behavior of two technologies (stepper motor and servo) used. It is built a Cartesian mechanism represents an industrial process for handling and storage technology applied to different movement soft lifting and transporting loads.

**Keywords:** Prototypes automated, orthogonal movements, didactic device, flexible cell.

**Resumen:** Este trabajo presenta una primera fase del desarrollo de un automatismo didáctico de movimientos ortogonales, con utilización de dispositivos tecnológicamente vigentes, para controlar movimientos en tres ejes, requeridos para simular una línea flexible de procesamiento industrial. La segunda fase implicará plantear y realizar los comparativos del comportamiento dinámico de dos tecnologías (motor paso a paso y servomotor) utilizadas. Se construyó un mecanismo cartesiano que representa un proceso industrial de movilización y almacenamiento, con diferente tecnología aplicada a los movimientos de levante y traslado de cargas.

**Palabras clave:** Prototipos automatizados, movimientos ortogonales, celdas flexibles.

## 1. INTRODUCCIÓN

El automatismo didáctico de movimientos ortogonales o Cartesiano, hace parte de un proyecto macro de la Universidad Pontificia Bolivariana que consiste en la construcción de una celda de manufactura conformada por una calle de selección (ya construida en una fase I), el presente proyecto (fase II) [1] una calle de ensamble que será la fase tres, los cuales trabajarán como un Centro Integrado de Manufactura CIM, el cual está representado en el esquema de la figura 1.

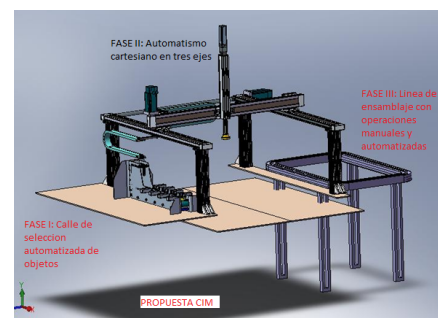


Fig. 1. Centro integrado de manufactura  
Fuente. Rincón F. Vesga J. UPB-BGA 2009

Se utilizó un sistema de movimientos ortogonales en tres ejes (X, Y, Z) para permitir la observación y la adecuada manipulación de objetos, que complementaran en forma automatizada con las funciones realizadas por la calle de selección y la calle de ensamblaje, por lo que queda catalogado como un robot tipo cartesiano.

La filosofía del macro proyecto es permitir, en forma didáctica, la observación de procesos de carácter industrial, utilizando en su diseño y construcción tecnología de uso vigente, con la propuesta adicional de contener elementos que permitan comparar diversas tecnologías en aplicaciones similares.

Basado en esta premisa se condicionó la elaboración de este prototipo al uso de dos diferentes tecnologías en el transporte (movimiento) en los diferentes ejes. Se estableció utilizar motor paso a paso y servomotor en los diferentes movimientos ortogonales del prototipo, tal como se ilustra en la figura 2.

El automatismo, una vez construido, debe permitir la ejecución de varias prácticas de laboratorio para las facultades aportantes, (Ing. Mecánica, Ing. Industrial), Una de estas prácticas es el estudio cinemático del mecanismo. Adicional se debe proyectar, previa instalación de instrumentación adecuada, el desarrollo de un estudio dinámico comparativo entre las dos tecnologías de movimiento utilizadas en el automatismo.

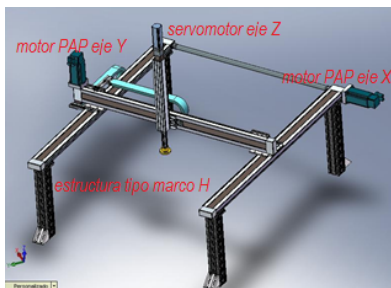


Fig. 2. Esquema automatismo cartesiano  
Fuente. Rincón F. Vesga J UPB-BGA 2009.

## 2. METODOLOGÍA

El desarrollo del automatismo didáctico de movimientos ortogonales (fase II del macro-proyecto), se basó en el siguiente enfoque metodológico, compuesto de 3 etapas:

- i) De Gestación (Ingeniería Conceptual, Ingeniería básica, Ingeniería de detalle).

- ii) De Ejecución (Construcción y prueba de prototipo).
- iii) De Gestión (implementación y pruebas de tecnologías, aplicaciones académicas).

Con dimensiones físicas y comportamientos estructurales y cinemáticos adecuadas que permitan realizar operaciones como manipulación (agarre, empuje), transporte (desplazamiento en los tres ejes) y almacenamiento (apilado) de elementos previamente seleccionados con un peso hasta de 3 Kg. Adquiriendo y utilizando tecnologías diversas y actuales, con el propósito académico de comparación de las mismas.

Para la metodología se tomó como referente la propuesta para diseño de máquinas (Hamrock 2000), la cual se adaptó al proyecto y se resume en la figura 3.

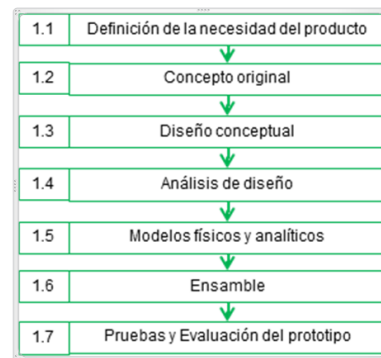


Fig. 3. Metodología de diseño.  
Fuente. Diseño de máquinas de B. Hamrock.2000

## 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Siguiendo la metodología se definen los siguientes pasos.

### 3.1 Definición de necesidades

El prototipo a desarrollar debe ser con fines didácticos, representar adecuadamente procesos industriales reales, aplicar una variedad aceptable de tecnologías que permitan formular propuestas de estudios comparativos y realizar prácticas de laboratorio para las facultades aportantes. Igualmente debe estar enmarcada en el macro-proyecto de un centro de manufactura planteado en tres fases, para lo cual el presente prototipo corresponde a la fase II.

### 3.2 Diseño conceptual del prototipo

Se toma como base una estructura metálica rígida que facilite el movimiento en un espacio

tridimensional. Se utilizará una tecnología diferente para lograr cada uno de los movimientos axiales, ortogonales entre sí. Será automatizado y controlado por un PLC de gama alta, para poderlo comunicar y supervisar junto con los otros prototipos del macro-proyecto y lograr un comportamiento unificado de los prototipos trabajando como centro integrado de manufactura.

Una de las principales discusiones alrededor del automatismo a desarrollar es la modalidad o tipo del mismo. Existen configuraciones cinemáticas diferentes, algunos tipos son: *cartesiano*, *angular*, *polar* y *SCARA entre otros*, tal como se muestra en la figura 4. Entre los cuales se seleccionó el tipo cartesiano por facilidad de manejo del espacio para almacenamiento de objetos y simplicidad de los movimientos.

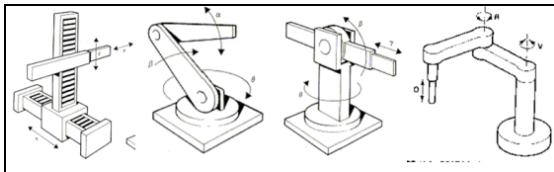


Fig. 4. Algunos tipos de accionamientos robóticos  
Fuente: [www.geocities.com/credit8/base/robotica.htm](http://www.geocities.com/credit8/base/robotica.htm)

### 3.3 Análisis de diseño del prototipo

Para este proyecto, se desarrolló un sistema cartesiano el cual está formado por tres articulaciones de tipo prismático, según tres ejes cartesianos ortogonales entre sí, pero montados en una estructura tipo H o puente grúa. Los movimientos en cada uno de los ejes se plantearon con varias posibilidades, seleccionando para el movimiento en los ejes de desplazamiento horizontal (X e Y) el accionamiento por medio de servomotor y para el movimiento ascendente descendente (Z) un accionamiento por motor paso a paso, con el fin de utilizar dos tecnologías diferentes y comparar aplicativos. Otra propuesta, para posterior estudio, es adaptar un servomotor a una de los ejes de movimiento horizontal, y ampliar así la gama de estudios comparativos.

El uso de estos sistemas de accionamiento implica complementar con software y hardware adecuado, según el fabricante de cada uno de estos sistemas, los cuales fueron adaptados en el tablero de mando, conectados y comandados por un programador (PLC) de gama media. Este sistema de mando automatizado permitirá mediante un panel de operador (*touchscreen*) comandar las acciones de movimiento, en forma manual y en automático, según la aplicación que se quiera representar.

La parte metalmecánica se diseñó y construyó en función de una estructura tipo marco en H o puente grúa, siguiendo la metodología de diseño mecánico (Hamrock, 2006), analizando las condiciones de operación críticas o máximas, que dependiendo de la propuesta presentada, establecía: velocidades máximas de desplazamiento 400 mm/seg, carga máxima a mover 3 kg, distancias máximas entre puntos inicial y final en el eje X 1900mm, en el eje X 850 mm y en el eje Z 400 mm.

La estructura debía ser lo suficientemente rígida para no deflectarse y las columnas debidamente dimensionadas para no pandearse. Algunos de los modelos cinemáticos contemplados se representan en las figuras 5

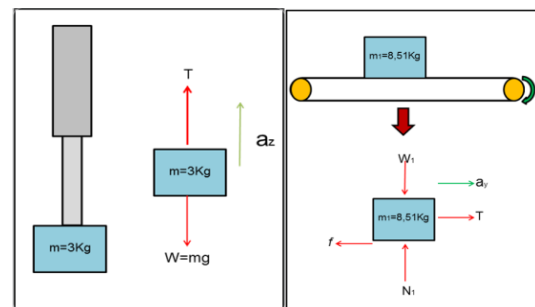


Fig. 5. Modelos cinemáticos para los ejes Z y X  
Fuente. Autores

Los modelos se desarrollaron en función de la cinemática en estado de equilibrio, y comportamiento acelerado, encontrando características de aceleración que experimentará la carga en el eje x de  $0,4\text{m/s}^2$ , para lograr velocidades de  $400\text{mm/s}$ , es decir,  $0,4\text{m/s}^1$ . Igualmente mediante un software de ingeniería se obtuvo un diámetro recomendado del elemento sobre el que se desarrollará el torque, de  $0,01\text{m}$  así, para levantar la carga de  $3\text{Kg}$  a una aceleración de  $0,4\text{m/s}^2$  se requiere aplicar un torque de  $0,156\text{N-m}$ .

El comportamiento cinemático deseado, es el entregado por el fabricante del dispositivo de movimiento seleccionado para cada eje y se muestra en la fig. 6 para el dispositivo de movimiento en el eje Z o servomotor y en la fig.7 para el dispositivo de movimiento en el eje X o motor Paso a Paso (PAP)

<sup>1</sup>El valor de la gravedad se ha tomado como  $10\text{m/s}^2$ , además para el cálculo inicial de todos los dispositivos se empleó el software *Positioning Drives*(FESTO), el cual hace algunas sugerencias de componentes para satisfacer dicho fin, y por tal razón, de allí se tomaron algunos valores como los diámetros en los cuales se ejercen los torques.

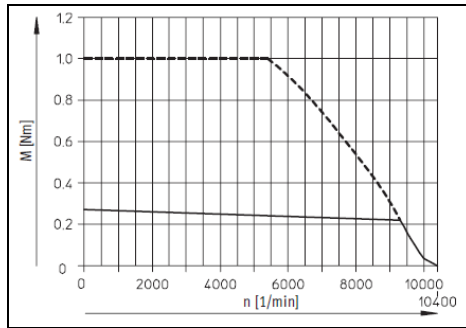


Fig. 6. Relación de velocidad/torque servomotor  
Fuente. FESTO

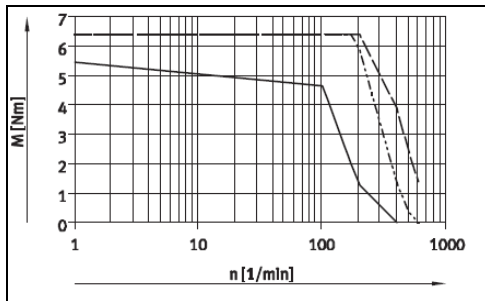


Fig. 7. Relación de velocidad/torque motor PAP  
Fuente. FESTO

El interés de la siguiente etapa (por realizar), de este proyecto, es la caracterización cinemática del automatismo ya construido y contrastarlo con los datos teóricos de referencia que entrega el fabricante (fig. 6 y 7). En función de la velocidad, aceleración y el torque obtenido en diferentes condiciones de trabajo, para lo cual es necesario instalar una sensorica adicional (sensor de torque, acelerómetros, tarjeta de adquisición de datos)

Una propuesta posterior a este estudio cinemático es el estudio del comportamiento dinámico, para lo cual es necesario establecer un modelo matemático complementario, el cual será objeto de trabajo en posterior informe.

#### 4. CARACTERÍSTICAS DEL AUTOMATISMO

El desarrollo del automatismo de movimientos ortogonales, plantea el uso de elementos de sensorica, resolver de posición, actuadores, controladores para los actuadores, electroválvula direccional neumática, presóstato, PLC, interface y módulo de entrada y salida, interface de comunicación profibus, interface hombre máquina (*touchscreen*). Todo esto bajo la premisa de integración de diversas tecnologías que permitan algún tipo de comparación, lo cual implica que se

utilizan por ejemplo, diferentes tipos de sensores para acciones similares, aunque el sentido común y el costo recomiendan utilizar una única clase de sensores.

Los *Sensores o detectores magnéticos/Reed* instalados en los actuadores son utilizados como detectores de posición o proximidad, ofrecen una precisión de conmutación de +/- 0,1 mm. Los *sensores detectores inductivos* se instalaron en el actuador de movimiento de otro de los ejes, se utilizaron debido a su baja sensibilidad a los impactos y su larga duración por ausencia de contacto o fricción.

Como dispositivo de agarre de la pieza de trabajo, se utilizaron dos tipos de tecnologías: Un *gripper o pinza* y una *ventosa de vacío*, ambos de operación neumática, los cuales pueden ser utilizados en forma independiente según se establezca en las prácticas académicas. Estos elementos neumáticos están regulados por un *presóstato* que entrega una señal por ausencia o por exceso de presión en el sistema de agarre.

Los *actuadores* seleccionados fueron motores Paso a Paso (PAP) y servomotor, cada uno de los cuales tiene características de diseño y funcionamiento diferente, pero presentan resultados aceptables en cuanto a capacidad y precisión de posición. Es de aclarar que los PAP requieren de dispositivos para determinar la posición de accionamiento denominados *Resolver*, que se selecciona de acuerdo a las características del actuador.

Tales características fueron planteadas de acuerdo a recomendaciones de los fabricantes, dentro de una gamma de posibilidades, en función de disponibilidad comercial y capacidad de trabajo, condicionado a su vez por una carga de trabajo pequeña y la condición didáctica del prototipo.

El PLC seleccionado corresponde a la Gama alta del fabricante, debido a la necesidad de utilizarlo como controlador principal de la supervisión y manipulación de toda la centro integrado de manufactura propuesto en el macro-proyecto, el cual incluye tres prototipos, uno de los cuales es el mencionado en este trabajo.

#### 5. INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Una vez construido el automatismo de movimientos ortogonales, y después de las pruebas preliminares de equipos (continuidad y

energización), se accionan los ejes X-Y-Z de manera individual bajo el software de parametrización respectivo (motor PAP con *FestoConfigurationToolFCT* y Servomotor con el software *Wmemoc*)<sup>2</sup>.

Para garantizar el buen funcionamiento, se necesita sólo de dos pruebas, el *Homing* (recorrido de referenciación a baja velocidad) y una rutina de varios desplazamientos (con velocidades diferentes).

El *Homing* es el desplazamiento que realiza un eje a una muy baja velocidad desde el sensor más lejano hasta el más cercano con respecto al motor como se aprecia en las figuras 8 y 9. La figura 8 relaciona el esquema utilizado para las pruebas en función de la ubicación de los sensores

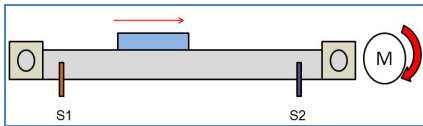


Fig. 8. Disposición de sensores en pruebas PAP  
Fuente. Autores

La figura 9 muestra una imagen con los resultados del *Homing* para el motor PAP del eje X. La fig. 10 muestra una imagen con la información obtenida en las pruebas de desplazamiento en el entorno del FCT, las cuales fueron pruebas realizadas satisfactoriamente con los motores paso a paso de los ejes X-Y.

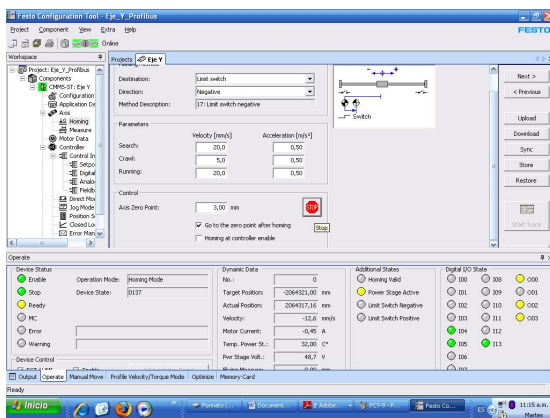


Fig. 9. Página de resultado Homing de PAP  
Fuente. Autores

Los desplazamientos fueron evaluados para diferentes velocidades, las cuales disponen de la información según se muestra en la fig. 10

FCT	No.	Mode	Position (mm)	Profile	Command	Unit	Input	Comment
	1	A	500,00	0	MC	2		
	2	A	250,00	0	MC	1		
	3	A	120,00	0	MC	1		
	4	A	50,00	0	MC	1		
	5	A						
	6	A						
	7	A						
	8	A						
	9	A						
	10	A						
	11	A						
	12	A						

Fig. 10. Página de resultado de desplazamientos  
Fuente. Autores

Parametrización similar se elaboró para el servomotor, con el software *Wmemoc* (FESTO). Una imagen con algunos de los resultados se muestra en la fig. 11.

Teniendo en cuenta esta característica del software, al hacer un barrido de velocidades, se determinó que la velocidad angular máxima que alcanza el motor es de 12000 rpm, que traducido con la constante de avance del cilindro DNCE de 10 mm/rev, el eje Z alcanzaría una velocidad máxima estimada de 12.5 m/s.

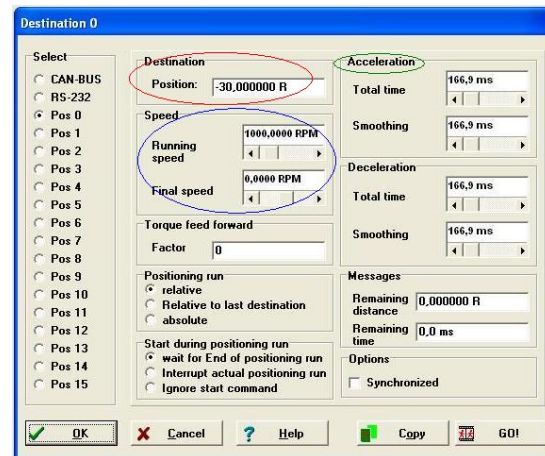


Fig. 11. Información para servomotor  
Fuente. Autores

Otra muestra de la integración de tecnologías se basa en el proceso de comunicación entre el PLC y los actuadores, la cual se realizó por medio de bus de campo *Profibus*. Las instrucciones de parametrización de los motores para adaptarlos a una red *Profibus* se realizaron desde el entorno de *SimaticStep* <sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Aplicativos Software de FESTO

<sup>3</sup> Aplicativo para PLC SIEMENS S7-200

Posteriormente, se hizo una prueba en conjunto con un modelo de comunicación Profibus (figura 12), donde se observa el PLC y los controladores de los actuadores, de tecnologías diferentes.

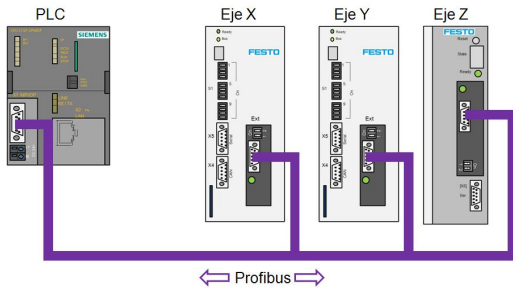


Fig. 12. Distribución de comunicación Profibus  
Fuente. Autores

## 6. PUESTA EN MARCHA, PRUEBAS Y RESULTADOS

Un estudio cinemático de un mecanismo implica el estudio de la posición, la velocidad y la aceleración en función de las trayectorias obtenidas y de las características dimensionales de los elementos en movimiento. En este trabajo se presenta el diseño y construcción del mecanismo, las dimensiones máximas y mínimas de posición y los errores de posición que presenta el accionar de los dispositivos de movimiento, así como los rangos máximos de velocidad teóricos.

En posterior estudio, y previa adquisición e instalación de sensorica complementaria (acelerómetros y tarjeta de adquisición de señales) se hará un estudio comparativo de aceleración. A manera de ejemplo, al desarrollar la interfaz HMI para el sistema, se pudo observar el margen de error que hay para cada motor.

En los procesos de prueba realizados de los cuales aquí no se presentan informes detallados, se toma una posición ideal a donde los ejes XYZ deben dirigirse y la posición real a los cuales éstos llegaron. Al calcular el margen de error en cada uno de ellos, se encontró que para el eje X este valor es del orden 0.02%, en el eje Y, del 0.03%, y en el eje Z del 0.001%; la figura 13 muestra un paralelo de los datos obtenidos en las pruebas, que muestran los valores para establecer el error.

De esto se puede intentar plantear una hipótesis donde un servomotor puede ser más preciso que los motores paso a paso en la manipulación de cargas pequeñas en condiciones de trabajo lentas.

Es importante resaltar que esta apreciación, para formularla en forma precisa, debe tener en cuenta las constantes de avance de cada eje, pues para el automatismo construido el eje Z posee una constante de 10 mm/rev, mientras que los ejes X-Y poseen constantes de 90 y 63 mm/rev<sup>4</sup> respectivamente, esta es otra razón por la cual el eje Z resulta ser más preciso que los otros dos.

En un estudio posterior se debe garantizar que las condiciones de operación sean similares (por ejemplo comparar solo los desplazamientos en el plano XY, cuando se trabaja en simultánea y cuando cada actuador en forma independiente).

	Target Position	Actual Position
X [μm]	400000	399944
Y [μm]	200000	199942
Z [μm]	-360000	-360002

Fig. 13. Comparativo en posición.  
Fuente. Autores

Este resultado es preliminar y no se realizó con la rigurosidad metodológica apropiada, pero sirve como un punto de inicio para proponer un estudio suficiente y organizado que mediante la estimación de tendencias y comportamiento cinemático se determine la real incidencia del tipo de tecnología en la precisión de la posición y la velocidad.

## 7. PRODUCTO FINAL

Se observa en la fig. 14 una fotografía del prototipo construido y ubicado en el laboratorio de proceso industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana. Se observan los tableros de potencia y de control automatizado, el automatismo tipo cartesiano y las conexiones de control e interfaces.



Fig. 14. Prototipo construido y en prueba.  
Fuente. Autores

<sup>4</sup> Datos suministrados por el fabricante.

## 8. RECONOCIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue apoyado financieramente por la facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga. El trabajo de diseño y construcción fue dirigido por el autor de este artículo, en un proyecto de grado de los estudiantes Fabián Rincón y Javier Vesga de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UPB.

## 9. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un automatismo de movimientos ortogonales, controlado por PLC, accionado por motores PAP y servomotor, que simula adecuadamente un proceso industrial de manipulación, transporte y almacenamiento de piezas de trabajo y permitirá el estudio del comportamiento cinemático del conjunto y de las partes.

El desarrollo de este automatismo permite lograr la integración de diferentes tecnologías para el desarrollo de operaciones que se encuentran en procesos industriales reales. Los dispositivos para automatización de última generación (aún de diferentes marcas y principios de operación), facilitan la integración de los mismos de una forma más amigable con el usuario, y admiten el registro y manipulación de información necesaria para establecer tendencias o para estudio de históricos en un proceso industrial.

El automatismo construido, plantea la operación simulada de un proceso industrial, el cual permite realizar prácticas de laboratorio a estudiantes de Ingeniería Industrial, por ejemplo en las temáticas de métodos y tiempos; igualmente para los estudiantes de Ingeniería Mecánica prácticas de laboratorio en automatización y en neumática, esto a nivel de pregrado. Pero este automatismo también permitirá realizar estudios y trabajos sobre comportamientos dinámicos, teoría del control y otros temas que fortalecen la investigación en Automatización y Control de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Queda el interés, a corto plazo, de desarrollar con el automatismo construido, el planteamiento y desarrollo de un estudio sobre el comportamiento dinámico del mismo, para lo cual hay que establecer y comprobar el modelo matemático apropiado, así como la adaptación de instrumentación complementaria.

## REFERENCIAS

- Rincón, F.; Vesga, J. *diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo robotizado cartesiano para prácticas de procesos industriales de almacenamiento y ensamble*. Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, 2009.
- Hamrock, B.; Jacobson B. *Elementos de Máquinas*. México, Mc Graw Hill, 2000.
- Piedrafita, R. *Ingeniería de la Automatización Industrial*. México, Alfaomega, 2004
- Ardila J.; Díaz, J. L. *Diseño e implementación de una celda de manufactura con el acople de PLC y manipulador rv-m1 utilizando el protocolo DDE*. Universidad de Pamplona, Colombia, 2007.
- Festo. *Sensores en la tecnica de fabricación*. México. Festo. 2007
- Hesse S. *Las pinzas y sus aplicaciones*. México. Festo. 2008
- Hesse S. *Sujetar con Aire Comprimido y Vacío*. México. Festo. 2008
- Lopez, C.; Plata, J. *Diseño, construcción y puesta en marcha de una calle para la selección de objetos caracterizados por sus propiedades físicas*. Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, 2007.
- Morales, I.; Tang, Y. *Diseño mecatronico de un Robot cartesiano enfocado al corte de piezas de calzado*. México 2004
- Profibus International. *Profibus, Technology and Application*. Publicación periódica. 2002.