

# CONTROL EN LAZO CERRADO DE UNA MESA POSICIONADORA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO LABVIEW

L. Ángel<sup>1</sup>, M.M. Coll<sup>2</sup>, C.A. Jerez<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Control Industrial, Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga

Recibido Junio 14, 2011- Aceptado Mayo 26, 2012

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v6n2.a04>

**Resumen**— Debido a la globalización, es necesario para todo sector industrial del país, pensar en invertir en tecnología que los mantenga a la altura de los estándares de producción y calidad exigidos por los compradores del exterior. Una opción tecnológica es la robótica, la cual permite asegurar estándares de calidad y un ritmo constante de producción, generando así beneficios para la empresa. Bajo este marco se construyó un prototipo de robot industrial, tipo mesa posicionadora, la cual cuenta con tres grados de libertad, siendo su funcionamiento apto para cualquier proceso que requiera características como precisión, velocidad de operación y flexibilidad de programación. Este prototipo tiene como objetivo motivar el desarrollo tecnológico y la construcción de maquinaria de automatización a un costo inferior al del mercado, manteniendo los estándares de calidad, con el fin ser empleado en la automatización de la industria de la región.

**Palabras clave**— Automatización, Globalización, Robótica, Desarrollo Tecnológico.

**Abstract**— Due the globalization is necessary for every industry to consider investing in technology to keep the production standards and quality demanded by foreign buyers. One option for this is robotics technology, which ensures quality standards and steadily production, generating profits for the company. Due to all the reasons presented before, was developed a prototype of an industrial robot, with three degrees of freedom, and that could work for any process that requires accuracy, speed of operation and that can be easy to operate. This prototype aims to encourage the technological development at a cost lower than the machines on the market, maintaining the quality standards, and that can be used in the automation for the industry of the region.

**Keywords**— Automation, Globalization, Robotics, technological development.

<sup>1</sup> Ph.D. Luis Ángel Silva, Docente de Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana,  
E-mail: luis.angel@upb.edu.co

<sup>2</sup> Martha Marcela Coll Sarmiento, Ingeniera Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana,  
E-mail: martha.coll@upb.edu.co

<sup>3</sup> Carlos Alberto Jerez Durán, Ingeniero Electrónico, Universidad Pontificia Bolivariana,  
E-mail: carlos.jerez@upb.edu.co

## I. INTRODUCCIÓN

Las máquinas herramienta son máquinas estacionarias que se utilizan para dar forma o moldear materiales eliminando parte del material con una forma determinada. Su utilización es fundamental en procesos metalmecánicos y pueden emplearse en tareas de corte, perfilado, desbaste, corte, perforación, y deformación de metales [1][2][3].

En el presente trabajo, se presenta el diseño, construcción y control de una máquina herramienta que será empleada en tareas de perforación. Esta máquina posee tres grados de libertad a lo largo de los ejes X,Y y Z, control de posición en lazo cerrado y ofrece versatilidad en la perforación de circuitos impresos [4].

Este tipo de máquina herramienta obedece a una trayectoria planificada desde un computador, la cual, es a su vez monitoreada, asegurando precisión y calidad en la realización de una tarea. Su estructura mecánica puede tener varios grados de libertad y además cuentan con una parte móvil, sobre la cual se monta la herramienta encargada de ejecutar la función para la cual fue diseñada. Dado que la operación conjunta de los diferentes grados de libertad del sistema permiten posicionar y orientar la herramienta en el espacio, estas máquinas son también conocidas con el nombre de mesas posicionadoras. Para el funcionamiento óptimo de este tipo de máquinas, el sistema de control debe garantizar un excelente desempeño en la operación de los motores que la forman, con el fin de obtener perfiles de velocidad de operación suaves y un posicionamiento preciso de la herramienta [5].

A nivel local, se han construido diferentes prototipos de máquinas posicionadoras, especialmente en el ámbito académico. Un prototipo de dos grados de libertad fue presentado en [6]. La estructura mecánica presentaba problemas de ajuste, el error de posicionamiento era grande, el sistema de control empleaba DELPHI y la velocidad de operación era 2 cm/s. El diseño y construcción de una mesa simuladora de sismos en una dirección fue presentada en [7] y [8], En [9] se presenta una mesa posicionadora X, Y empleada en la realización de dibujos. Utiliza dos motores paso a paso, el sistema de control está basado en un microcontrolador DSPIC, y la velocidad de operación es de 1 cm/s. Un prototipo de

mesa XY es presentado en [10]. Emplea dos motores paso a paso y un PLC para generar la secuencia de giro de los motores y establecer la comunicación con una pantalla táctil.

A nivel internacional, se destacan modelos comerciales con diferentes grados de libertad empleados en diversas aplicaciones industriales. En la Fig. 1, se presenta la máquina herramienta Torchmate 2x2. Es utilizada para corte de metales con láser y puede alcanzar una velocidad de desplazamiento de 6,35cm/s [11].

Desde el punto de vista de fabricación de prototipos, una mesa fue construida como tesis de grado en la Universidad de Loja, Ecuador [12]. Esta mesa cuenta con tres grados de libertad, permite realizar tareas de perforación y puede alcanzar una velocidad de operación de 1cm/s (Fig. 2). Otro prototipo fue desarrollado en la Universidad Tecnológica Mixteca, México [13]. Cuenta con tres grados de libertad y tiene una velocidad máxima de desplazamiento de 5cm/s (Fig. 3).



Fig. 1. Máquina de corte laser

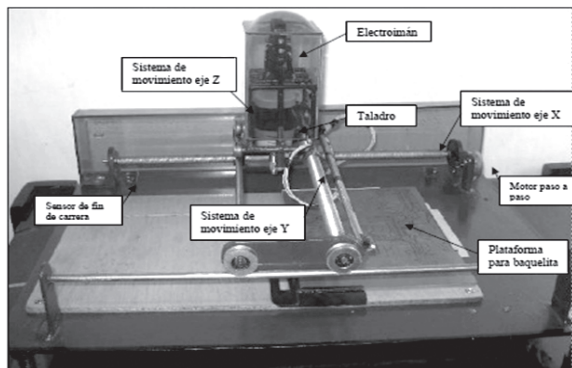


Fig. 2. Prototipo Universidad de Loja

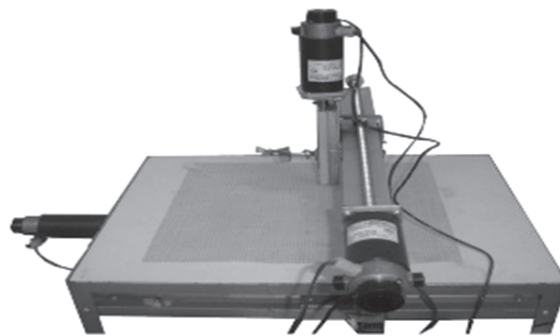


Fig. 3. Prototipo Universidad de Mixteca

El prototipo de máquina herramienta presentado en éste artículo, tiene tres grados de libertad a lo largo de los ejes XYZ y la velocidad de operación alcanzada le confiere un buen desempeño en tareas de perforación de circuitos impresos. El posicionamiento de la herramienta (taladro) se realiza a través de control numérico por computador (CNC), el cual permite la programación, el control y el monitoreo de la posición de los ejes [14] [15].

La estructura mecánica del prototipo es tipo mesa y el desplazamiento a lo largo de los ejes X y Y se logra a través de dos correas dentadas. El sistema de accionamiento está formado por tres motores paso a paso y sus respectivos drivers, los cuales generan la secuencia de conmutación de las bobinas de cada motor y suministran la potencia requerida para su operación. El sistema de control emplea un controlador proporcional en lazo cerrado, logrando así una mayor precisión en el posicionamiento de la herramienta sin afectar la velocidad de operación. Una aplicación desarrollada en Labview supervisa, programa y controla el desempeño de la mesa. La comunicación entre el computador y la mesa se realizó por medio de una tarjeta de adquisición de datos (NI USB6008) de la empresa National Instruments.

En la Fig. 4 se muestra un esquema del prototipo construido. El módulo driver es el encargado de controlar el motor paso a paso y de enviar las señales de los encoders al computador a través de la tarjeta de adquisición. Allí se ejecuta el algoritmo de control dando como resultado la dirección, velocidad y distancia que deben recorrer los ejes de la mesa posicionadora. Mediante la tarjeta de adquisición, estos datos son enviados al circuito acondicionador de señal y vuelven al driver del motor, cerrando así el lazo de control.

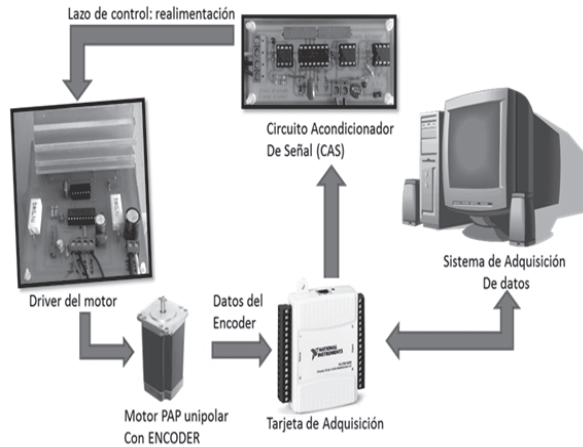


Fig. 4. Esquema del Proyecto desarrollado

A continuación se describe la máquina herramienta construida, haciendo referencia a cada una de las partes que conforman la estructura mecánica y el sistema de actuación. Posteriormente, se presenta el software desarrollado, enfatizando en el sistema de adquisición de datos y las estrategias de control implementadas. Finalmente, se presenta el prototipo, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en tareas de posicionamiento multipunto.

## II. PROTOTIPO CONSTRUIDO

A continuación se presentan las partes que conforman el prototipo de máquina-herramienta: la estructura mecánica, el sistema de actuación y el sistema de control.

### 2.1 Estructura Mecánica

Se compone de todas las piezas mecánicas, las cuales se explican a continuación a partir de la Fig. 5.

#### 2.1.1 Soporte Motores (1, 2,3)

Acoplan los motores paso a paso a sus respectivos ejes. Están contruidos en aluminio.

#### 2.1.1 Soporte de la Herramienta (4)

Permite sujetar y desplazar la herramienta, manteniéndola centrada. Para realizar las pruebas de la máquina se utilizó un taladro como herramienta. Cuatro tornillos aprisionan las platinas que mantienen el taladro en su puesto.

#### 2.1.2 Plataforma de Perforación (5)

Tiene un área de 360mm x 330mm. Para lograr su movimiento se cuenta con un sistema de barras lisas y correas dentadas.

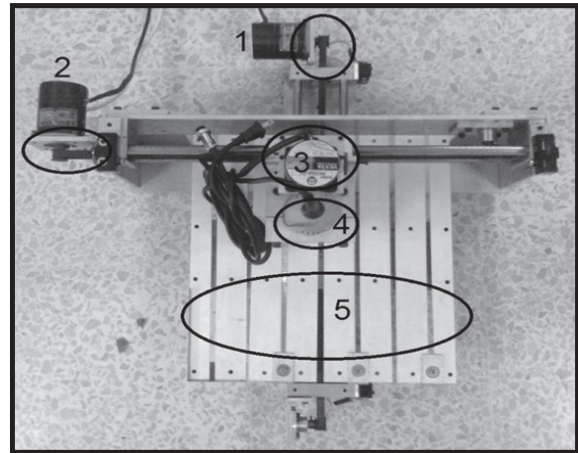


Fig. 5. Prototipo construido

## 2.2 Sistema Electrónico

La parte electrónica implementada se compone de un circuito acondicionador de señal (CAS) para la realimentación del sistema, un driver para los motores paso a paso encargados del movimiento de los ejes (X, Y) y un driver para el motor del eje Z. También cuenta con dos sensores final de carrera por cada eje, con el fin indicar la posición de inicio (HOME) o de detectar algún fallo en el desplazamiento normal de la máquina, cumpliendo así con las medidas de seguridad requeridas en la industria.

### 2.2.1 Circuito Acondicionador de Señal

El circuito acondicionador de señal (CAS) es el encargado de enviar las señales provenientes de la tarjeta de adquisición hacia el driver del motor. La adquisición de los datos de los encoder se lleva a cabo mediante una tarjeta NI USB 6008. Para cerrar el lazo de control se utilizó una salida analógica de voltaje de esta, la cual varía de 0 a 5 voltios. El CAS se encarga de transformar el voltaje analógico en un tren de pulsos, de frecuencia variable, el cual pone en funcionamiento el driver del motor paso a paso.

En la Fig. 6 se muestra el diseño del CAS, este está formado por un circuito integrado ICL8038, encargado de convertir la señal de voltaje, que entrega la tarjeta de adquisición, en un tren de pulsos. Antes de transmitir esta nueva señal al driver del motor debe ser acondicionada por un amplificador.

### 2.2.2 Driver Motor Paso a Paso

Teniendo en cuenta las características eléctricas de los motores seleccionados, 2.5A para los motores de los ejes X y Y, y 1.2A para el motor del eje Z, se decidió implementar dos tipos diferentes de drivers, como se describe a continuación

*Motores Ejes X y Y*

El driver de estos motores utiliza un circuito integrado L297, el cual genera la secuencia de pulsos necesaria para hacer girar el motor. Para obtener la corriente que necesitan las bobinas del motor, se utilizaron cuatro MOSFET IRFZ44N. En la Fig. 7 se puede observar un esquema eléctrico del driver de cada motor.

*Motor Eje Z*

Para el funcionamiento de este motor se implementó otro tipo de driver, puesto que éste motor no posee encoder y tiene un consumo bajo de corriente. El diagrama Eléctrico de este driver se muestra en la Fig. 8. Emplea dos Flip-Flop JK y una compuerta EXOR, las cuales generan la secuencia de pulsos necesarios para mover el motor, junto con 4 transistores TIP 120 que se encargan de impulsar la corriente.

*2.2.3 Sensores Final de Carrera*

Estos sensores tienen como finalidad proteger la estructura mecánica de la mesa en la realización

de desplazamientos cercanos a los límites del espacio de trabajo del sistema. Al ser cualquiera de ellos pulsado, el software de control detecta que existe un fallo en el sistema y se reinicia el proceso.

Además, estos sensores son empleados en la rutina inicial de movimiento para sincronizar los ejes X y Y de la mesa y determinar la posición de inicio (HOME).

*Sensor de seguridad*

Consiste en dos sensores finales de carrera ubicados al final de cada uno de los recorridos (X y Y), con el fin de prevenir un daño en la estructura mecánica de la mesa. Esto se puede dar, en el caso en que el desplazamiento sobre algunos de los ejes sobrepase físicamente el máximo límite de operación. Al ser pulsados cualquiera de estos sensores se debe asumir que existe un fallo en el sistema y debe reiniciarse el proceso llevando automáticamente cada eje de nuevo a la posición HOME.

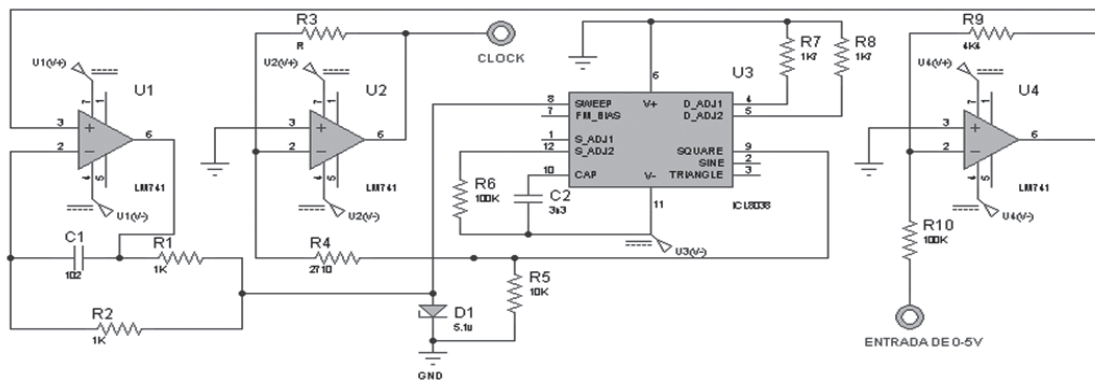


Fig. 6. Circuito Acondicionador de Señal

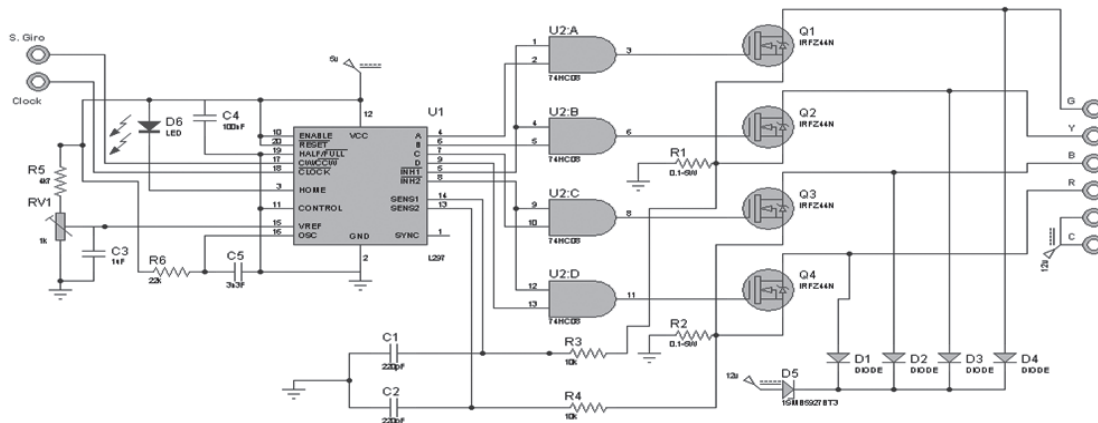


Fig. 7. Driver para los motores de los ejes X y Y



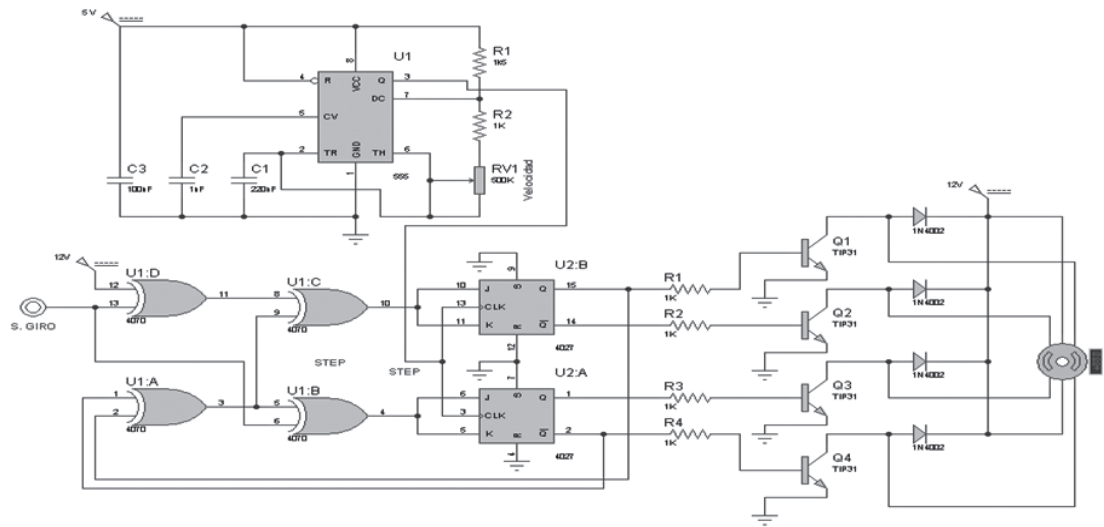


Fig. 8. Driver para el motor del eje Z

### 2.3 Software Implementado

A continuación se presenta: el software desarrollado para el funcionamiento de la mesa posicionadora, el sistema de adquisición de datos y el tipo de control utilizado para lograr el posicionamiento de la máquina.

#### 2.3.1 Adquisición de datos

La plataforma de programación Labview cuenta con un módulo DAQ Assistant, diseñado explícitamente para funcionar con la tarjeta de adquisición de datos NI USB, la cual cuenta con una entrada de contador, diseñada para soportar frecuencias de hasta 5Mhz. Al poseer solo una entrada contador se limita la adquisición de datos a un solo canal por encoder. Por lo tanto, fue necesario diseñar por software, un sistema de incremento y decremento de pulsos, con el fin de determinar el sentido de giro y la disminución del error al acercarse a la posición deseada.

#### 2.3.2 Estrategia de Control

La estrategia de control se basa en la implementación de dos lazos de control anidados, el primer lazo de control se encarga del control de posición cartesiano (X, Y) y el segundo lazo de control está encargado del control de velocidad de cada motor.

#### Control de Posición

Para el funcionamiento de los motores se escogió un control proporcional, el cual se implementó en cada uno de los ejes de forma independiente. Sin embargo, su funcionamiento fue sincronizado mediante el planificador de trayectorias a través del cual, se garantiza que los motores que realizan el desplazamiento a lo largo de los ejes X y Y empiezan y

terminan su movimiento al mismo tiempo sin importar que las distancias recorridas sean diferentes.

Se escogió un control proporcional por tratarse de motores paso a paso, estos son muy precisos y fáciles de controlar. En la Fig. 9 se muestra el programa realizado. A continuación se explicará cada una de sus áreas principales

*Área 1:* En esta primera parte se calcula la señal de error a partir de la diferencia entre la señal de referencia dado por el usuario y la señal de encoder de cada eje. El algoritmo puede recibir señales de referencia punto a punto o multipunto, facilitando la programación de trayectorias.

*Área 2:* En la segunda parte se multiplica el error hallado por una constante proporcional. El valor de esta constante se seleccionó a partir de los límites del voltaje de saturación del motor ( $\pm 10V$ ). A la salida del controlador proporcional se tiene un valor en centímetros, el cual debe ser convertido a su equivalente en voltaje. La equivalencia se obtiene de la relación entre el valor máximo en centímetros que puede tomar la señal de referencia y el máximo valor de voltaje que se puede obtener.

El signo del valor de la señal de error determina el sentido de giro del motor. Si el valor de la señal de error es mayor a cero, el motor girará a la derecha, en caso contrario, el motor girará a la izquierda.

*Área 3:* En esta parte del programa se revisa que el voltaje de salida no sobrepase los valores permitidos por la tarjeta de adquisición. Mediante una serie de comparadores y selectores, no permiten el paso de una señal de voltaje mayor a

5V o menor a 0V, esto garantiza que el programa no presente ningún error a la hora de ejecutarse.

*Área 4:* Por último, en esta parte del algoritmo se muestra como se envía la señal del sentido de giro a la tarjeta de adquisición, por medio del módulo DAQ Assistant configurado como salida digital. De igual forma, se envía el voltaje de salida a través de un nuevo módulo DAQ Assistant configurado como salida análoga.

*Control de velocidad*

El control de velocidad utilizó el módulo PID de Labview (Fig. 10). Este control permite que el perfil de velocidad de los motores incremente y decremente de forma suave desde un valor cero hasta la velocidad máxima indicada por el planificador de trayectorias. Las constantes para este controlador fueron sintonizadas mediante prueba y error, teniendo en cuenta las características dinámicas de los motores. Esta señal de control maneja los drivers de cada motor.

*2.3.3 Planificador de Trayectorias*

El objetivo de un planificador de trayectorias es controlar el desplazamiento de la herramienta, logrando que el recorrido descrito por los ejes al moverse sea una línea recta [16]. Para esto, se asume que el movimiento de cada eje es lineal, de manera que:

$$X = V_x * t_x \quad Y = V_y * t_y \quad (1)$$

en donde X y Y es la distancia,  $V_x$  y  $V_y$  la velocidad y  $t_x$  y  $t_y$  el tiempo requerido en el movimiento de cada eje.

Para lograr que el desplazamiento a lo largo de cada eje se efectuó en el mismo tiempo, se calcula el tiempo requerido para realizar cada desplazamiento asumiendo que los dos ejes se desplazan a la máxima velocidad de operación posible. Calculados estos tiempos, se toma el tiempo de mayor valor, el cual permitirá recalculer las nuevas velocidades de operación de cada eje de desplazamiento. Las nuevas velocidades de desplazamiento son:

$$V_{xn} = \frac{X}{t_{max}} \quad V_{yn} = \frac{Y}{t_{max}} \quad (2)$$

donde  $V_x, V_x$  son las nuevas velocidades de desplazamiento de cada eje [17] [18].

Como paso final, se halla un equivalente de voltaje para cada motor a partir de cada una de las velocidades encontradas ( $V_x, V_x$ ) anteriormente, de manera que:

$$Vol\_MotorX = \frac{(V_{xn} * Vol\_Max)}{Vel\_Max} \quad (3)$$

$$Vol\_MotorY = \frac{(V_{yn} * Vol\_Max)}{Vel\_Max}$$

En la Fig.a 11 se observa un diagrama de bloques de la implementación de las estrategias de control descritas anteriormente. Se identifica el lazo interno de control de velocidad, el lazo externo de control de posición y el planificador de trayectorias. La señal de realimentación es suministrada por la señal de encoder de cada motor.

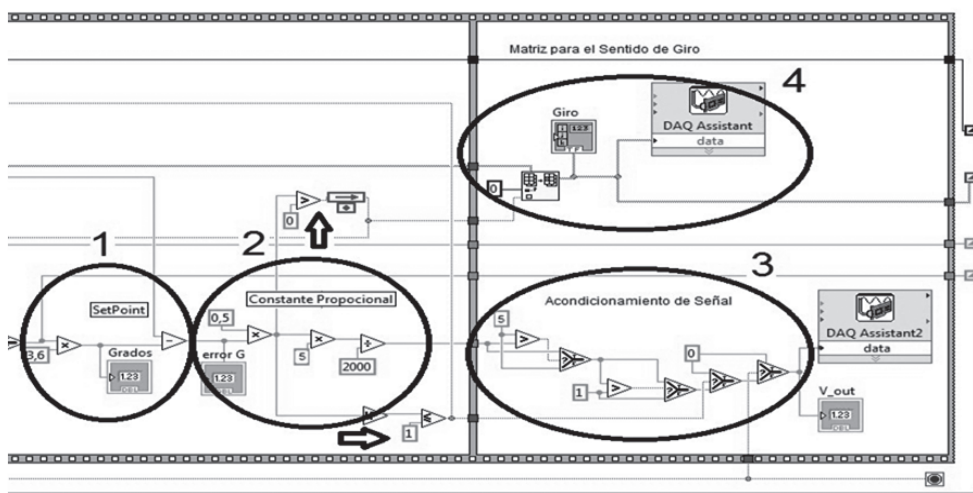


Fig. 9. Control de Posición

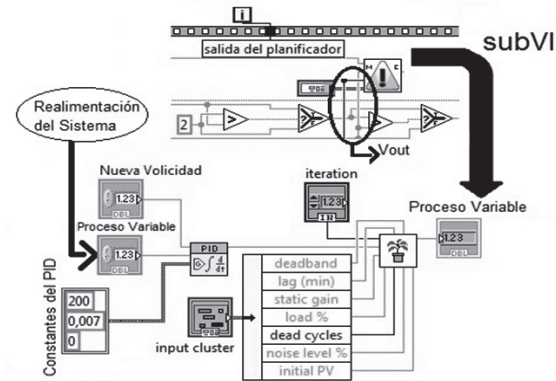


Fig.10. Circuito control de velocidad

2.4 Prototipo

En la Fig. 12 se presenta el prototipo final construido. Se observa el modulo que aloja los drivers de los motores, las tarjetas de adquisición, el computador donde se ejecuta el algoritmo de control y estructura mecánica de la mesa posicionadora, con las respectivas conexiones de cada motor. Como herramienta final sobre el eje z, se ha dispuesto un motortool como ejemplo de aplicación de la mesa en tareas de posicionamiento y perforación.

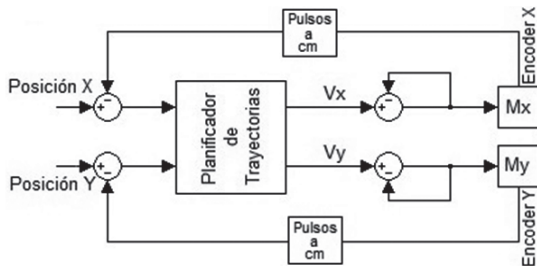


Fig.11. Diagrama Estrategias de Control

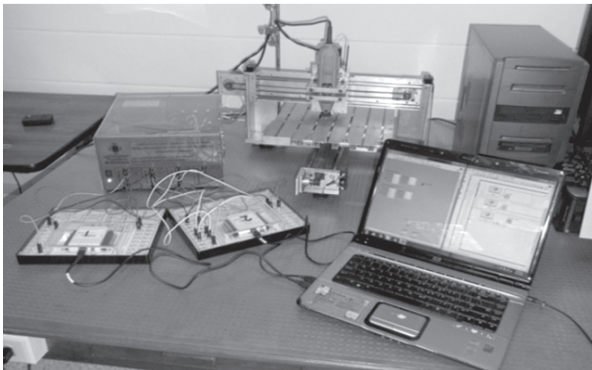


Fig. 12. Prototipo Final

III. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

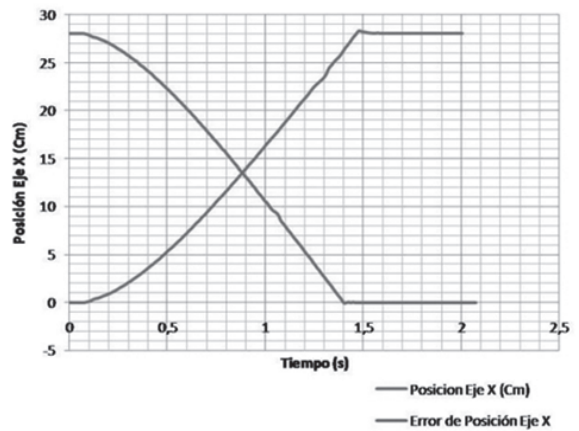
A continuación se presentan pruebas realizadas al prototipo, así como los resultados obtenidos en la realización de trayectorias de un único punto y multipunto.

Prueba 1: Perfil de posición para un movimiento entre dos puntos

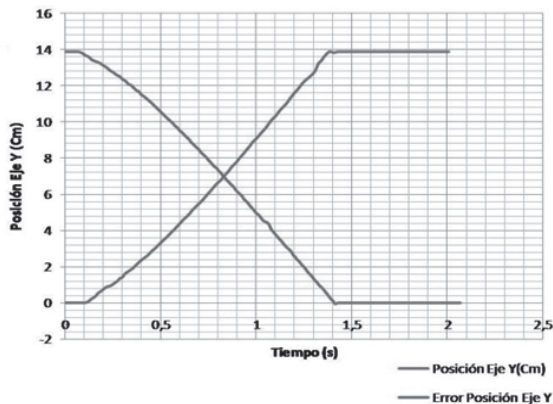
Para la primera prueba, se asignó como posición final deseada para los ejes X y Y la pareja coordenada (28.1cm, 13.8cm). La posición inicial (HOME) está especificada mediante la pareja coordenada (0cm, 0cm).

La evolución del movimiento en el eje X y en eje Y, así como la evolución del error de posición se muestra en las Fig. 13 y 14, respectivamente. Se observa como la posición de cada eje varía suavemente desde la posición HOME hasta la posición deseada. Una vez los ejes X y Y se han posicionado, el error disminuye exponencialmente hasta un valor aproximado de 1mm. Este comportamiento asegura la estabilidad asintótica del sistema. Además, se puede observar que el tiempo de establecimiento para el movimiento de los dos ejes es el mismo, lo que indica que el planificador de trayectorias funciona correctamente.

En la Fig. 15, se muestra la trayectoria descrita por la herramienta. Esta trayectoria es lineal, lo que indica el posicionamiento simultáneo de los dos ejes sin importar que los valores finales de posición deseados para cada eje sean diferentes.



(a)



(b)

Fig. 14. Prueba 1: Evolución de la posición y de la señal de error, (a) eje x, (b) eje y

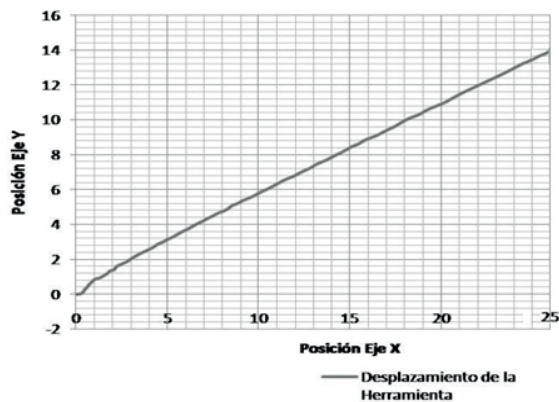


Fig. 15. Prueba 1: Desplazamiento de la herramienta

*Prueba 2: Perfil de velocidad para un movimiento entre dos puntos con iguales y diferentes.*

1) *Para una posición deseada con valores iguales para cada eje*

Para la prueba se asignó para la posición deseada la pareja coordenada (28.1cm, 28.1cm). Los perfiles de velocidad obtenidos para cada eje en la ejecución del movimiento deseado se muestran en las Fig. 16 y 17, respectivamente. La velocidad evoluciona suavemente hasta alcanzar un valor de 9 cm/s. Este valor de velocidad es similar para ambos ejes lo que indica la sincronización dada por el planificador de trayectorias.

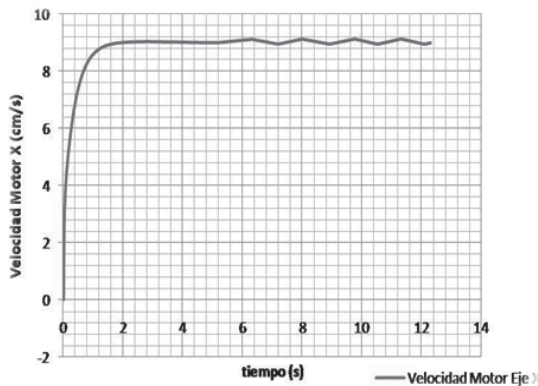


Fig. 16. Prueba 2: Perfil de velocidad en el eje x para una posición deseada con valores iguales para cada eje

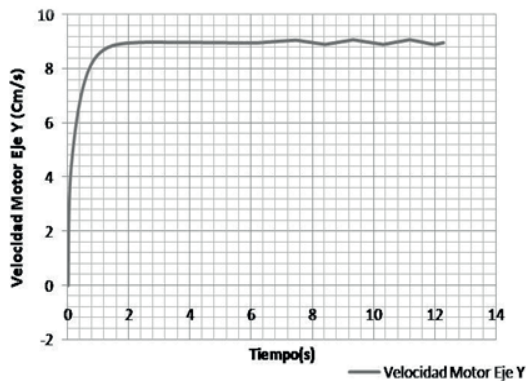


Fig. 17. Prueba 2: Perfil de velocidad en el eje y para una posición deseada con valores iguales para cada eje

2) *Para una posición deseada con valores diferentes para cada eje*

Para la segunda parte de la prueba, se tomó como posición deseada la pareja coordenada (28.1cm, 13.8cm). Los valores de esta posición deseada fueron invertidos posteriormente, con el fin de observar el comportamiento de los perfiles de velocidad determinados por el planificador de trayectorias. Las Fig. 18 y 19, muestran los perfiles de velocidad obtenidos para cada uno de los movimientos realizados. En este caso, se observa como los valores de las velocidades se han invertido para cada eje, al invertirse las coordenadas del punto final deseado



Como se puede observar en la Fig. 18, la velocidad máxima alcanzada en el eje velocidad del motor Y es de 9Cm/s, mientras que la velocidad del motor del eje X llega a ser de 18Cm/s, dado que la distancia a recorrer en ese eje es el doble. De igual forma, se observa el incremento en la velocidad desde 0Cm/s hasta la indicada por el planificador. Se logró que la velocidad de desplazamiento para cada eje supere las velocidades logradas en proyectos similares por otras universidades.

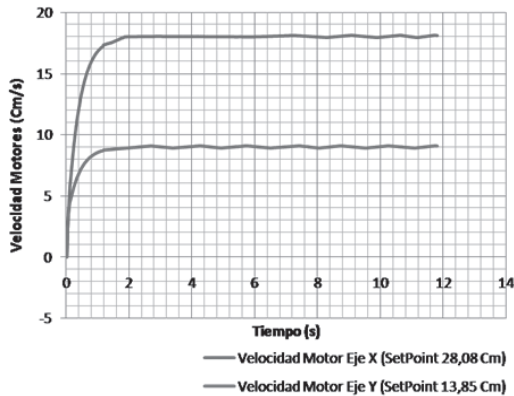


Fig. 18. Prueba 2: Perfil de velocidad en el eje x y en el eje y para una posición deseada con valores diferentes para cada eje

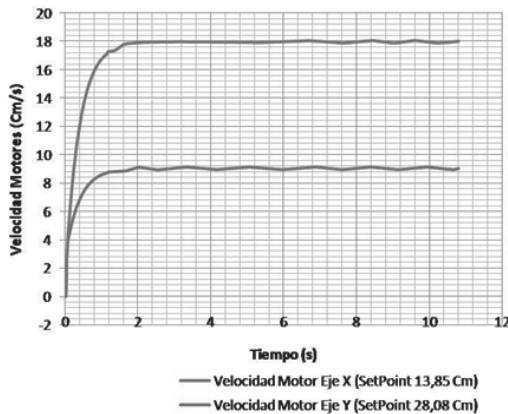


Fig. 19. Prueba 2: Perfil de velocidad en el eje x y en el eje y para una posición deseada con valores diferentes para cada eje (con valores deseados invertidos con respecto a los resultados mostrados en la Figura 18)

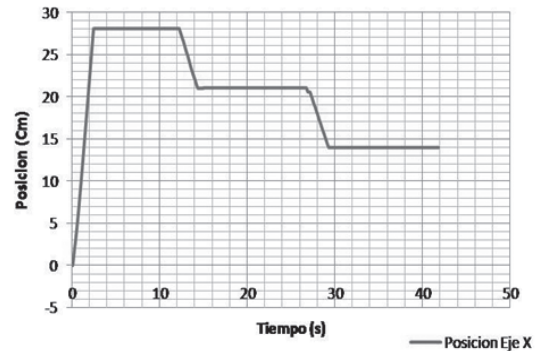
**Prueba 3:** Posición, Error y Velocidad en trayectorias multipunto.

Para esta prueba se escogieron tres posiciones, dadas por los pares coordenados (28.1cm, 28.1cm), (21.1, 13.8cm) y (13.8cm, 21.1cm).

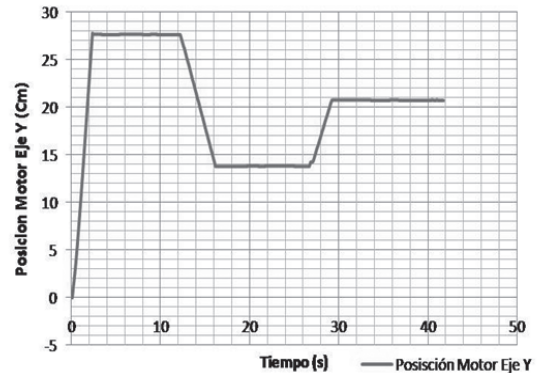
En la Fig. 21, se puede observar el desplazamiento llevado a cabo por la herramienta en cada uno de los

ejes. Nótese que a pesar de ser recorridas distancias diferentes el tiempo total de ejecución de la rutina es el mismo.

En la Fig. 22 se puede observar como disminuyen los errores al posicionarse la herramienta en cada uno de los puntos intermedios deseados. Los errores de valor negativo se presentan cuando el motor recibe la orden de retroceder en su desplazamiento, puesto que el valor de la posición actual es mayor que el de la nueva posición, resultando una resta de valor negativo, esto es lo que indica el cambio de giro del motor.



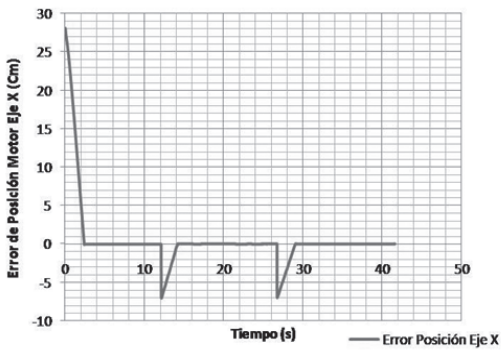
(a)



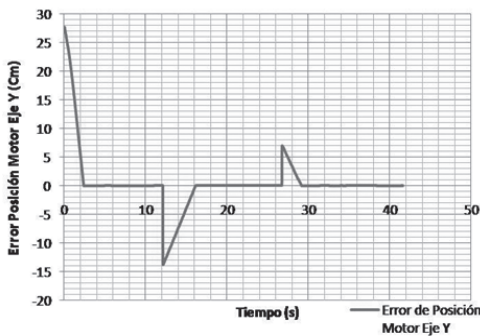
(b)

Fig. 21. Prueba 3: Perfil de posición en la ejecución de una trayectoria multipunto, (a) eje x, (b) eje y

En la Fig. 23 se presentan los perfiles de velocidad a lo largo de los ejes X y Y. Como se puede observar, en la parte inicial del movimiento las velocidades son iguales, ya que los puntos intermedios deseados para cada eje son los mismos. En los puntos intermedios siguientes, las velocidades cambian según lo determinado por el planificador de trayectorias. Esto asegura que el desplazamiento de la herramienta sea lineal en todo momento.

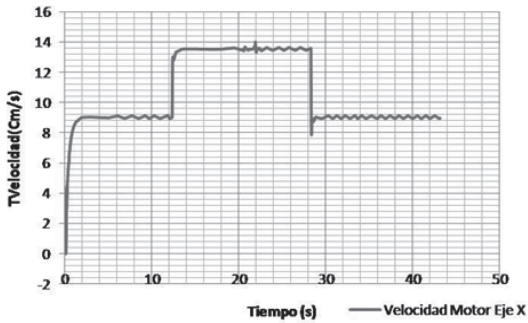


(a)

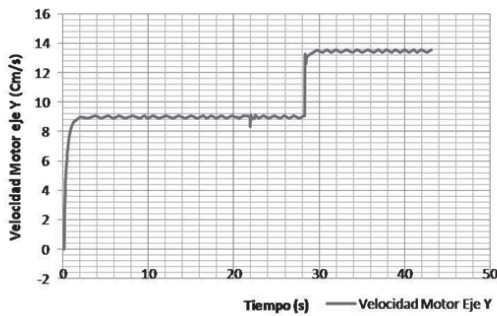


(b)

Fig. 22. Prueba 3: Señal de error de posición en la ejecución de una trayectoria multipunto, (a) eje x, (b) eje y



(a)



(b)

Fig. 23. Prueba 3: Perfil de velocidad en la ejecución de una trayectoria multipunto, (a) eje x, (b) eje y

Finalmente, en la Fig. 24 se muestra el recorrido de la herramienta para la trayectoria multipunto propuesta. Como se observa el desplazamiento es lineal entre cada punto intermedio; lo cual indica que el prototipo está funcionando correctamente.

Un video donde se muestra el prototipo en operación puede ser encontrado en el enlace web: <http://www.youtube.com/watch?v=OMxyzBfQRL0>

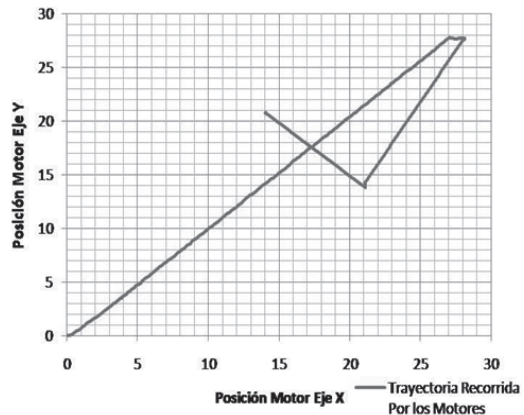


Fig. 26. Prueba 3: Desplazamiento de la herramienta en la ejecución de una trayectoria multipunto

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el diseño, construcción y control de un prototipo de mesa posicionadora con tres grados de libertad. El prototipo desarrollado cumple con las características de precisión, velocidad de operación y flexibilidad de programación que se requieren para llevar a cabo procesos de perforación. Se logró que los lazos de control desarrollados para el posicionamiento de la herramienta se sincronizaran mediante el planificador de trayectorias, haciendo que el rendimiento de la máquina aumente significativamente.

Este proyecto es un importante avance para el desarrollo de la industria de la región, ya que abre la posibilidad de automatizar procesos de manufactura manteniendo la calidad de producción e invirtiendo en tecnología nacional.

Como trabajo futuro se plantea la utilización de servomotores en el sistema de actuación, los cuales traerían mayor velocidad de operación, precisión y permitiría el desarrollo de nuevas estrategias control.

## REFERENCIAS

- [1] G.K. Boon, A. Mercado, *Automatización Flexible en la Industria*, Ed. LIMUSA-Noriega, México, 1991.
- [2] R.L. Martino, *Sistemas Integrados de Fabricación*, Ed. LIMUSA-Noriega, México, 1990.
- [3] X.W. Xu, S.T. Newman, Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent—a review of the technologies, *Computers in Industry*, Volume 57, Issue 2, February 2006, Pages 141-152
- [4] M.M. Coll, C.A. Jerez, Control en lazo cerrado de una mesa posicionadora utilizando LabView, *Universidad Pontificia Bolivariana*, 2011.
- [5] A. Lasemi, D. Xue, P. Gu, Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review, *Computer-Aided Design*, Volume 42, Issue 7, July 2010, Pages 641-654
- [6] J. Remolina, R. Tarazona, Control de posición bidimensional aplicado a la mesa de perforación “COMPOS”, *Universidad Pontificia Bolivariana*, 2000.
- [7] S. Jaimes, C.J. Ortega, Diseño y construcción de una mesa simuladora de sismos en una dirección, *Universidad Pontificia Bolivariana*, 2001.
- [8] V.J. Pimentel, Construcción de una mesa vibratoria para simular sismos en una dirección, *Universidad Pontificia Bolivariana*, 2001.
- [9] D. Hernández, Mesa de posicionamiento XY para múltiples propósitos, *Universidad Pontificia Bolivariana*, 2010.
- [10] J.A. Correa, R.D. Carrillo, Aplicación del PLC SIEMENS S7\_200 para el posicionamiento automático de una mesa XY monitoreado por pantalla táctil, *Universidad Pontificia Bolivariana*, 2010.
- [11] Torchmate CNC Cutting Systems. Torchmate 2x2, [http://torchmate.com/products/torchmate\\_2x2/](http://torchmate.com/products/torchmate_2x2/), 2011.
- [12] A.P. Calle, Diseño e implementación de un equipo para la perforación de circuitos impresos por medio de control numérico, *Universidad Técnica de Loja*, Ecuador, 2008-
- [13] M. Muñoz, Prototipo electromecánico para dibujar circuitos impresos sobre una placa de cobre, *Universidad Tecnológica de la Mixteca*, 2010.
- [14] T. Newman, A. Nassehi, X.W. Xu, R.S.U. Rosso Jr., L. Wang, Y. Yusof, L. Ali, R. Liu, L.Y. Zheng, S. Kumar, P. Vichare, V. Dhokia, Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 24, Issue 6, December 2008, Pages 699-708.
- [15] Y. Altintas, W.K. Munasinghe, A Hierarchical Open-Architecture CNC System for Machine Tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 43, Issue 1, 1994, Pages 349-354.
- [16] C.H. Yang, T. Kong, Parametric interpolator versus linear interpolator for precision CNC machining, *Computer-Aided Design*, Volume 26, Issue 3, March 1994, Pages 225-234.
- [17] A. Gasparetto, V. Zanotto, A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 42, Issue 4, April 2007, Pages 455-471.
- [18] Xuan F. Zha, Optimal pose trajectory planning for robot manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 37, Issue 10, October 2002, Pages 1063-1086.

## BIOGRAFÍA



Luis Ángel Silva recibió el grado de Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, en 1998, el grado de Especialista en Control de Procesos Industriales de la Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, en 2000 y el grado de Doctor en Automática y Robótica de la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, en 2005.

Actualmente, es profesor asociado en la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, y sus líneas de investigación incluyen procesamiento de imágenes, robótica móvil, y diseño y control de robots industriales. El es miembro de la IEEE, donde ha publicado cerca de 20 artículos.



Martha Marcela Coll Sarmiento, Ingeniera Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga. Actualmente se encuentra desarrollando un proyecto de investigación en control y automatización industrial.



Carlos Alberto Jerez Durán, Ingeniero Electrónico de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga. Actualmente se encuentra desarrollando un proyecto de investigación en control y automatización industrial.