

SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL DE UN TORNO CNC DIDÁCTICO

AN ELECTRONIC CONTROL SYSTEM OF A CNC LATHE BUILT WITH EDUCATIONAL PURPOSES

HOWEIMER PEÑA A.¹
JUAN MARTÍNEZ Q.²

RECIBIDO: MAYO 2009
APROBADO: SEPTIEMBRE 2009

RESUMEN

El diseño y la construcción de un torno automático implica el desarrollo de un sistema mecánico, un sistema electrónico y un sistema informático, los cuales han de interactuar para moldear un material mediante el desprendimiento de viruta, tomando como guía un código CNC de entrada. El desarrollo de un sistema con componentes mecánico, electrónico y computacional corresponde a un sistema mecatrónico [1], en el cual los diseños se complementan a fin de cumplir con un objetivo general. El presente artículo describe el proceso de diseño del sistema electrónico de control de un torno automático CNC de uso didáctico, explicando operativamente cada uno de sus componentes y los requerimientos que guiaron el proceso de diseño.

Palabras clave

Torno CNC, control discreto, PID, compensación de fase.

Abstract

The design and construction of an automatic lathe implies the development of a mechanical system, an electronic system and a data processing system, which have to interact aiming to mold a material through the detachment of shaving; taking as a guide a CNC input code.

The development of a system with computational, electronic, and mechanical components corresponds to a mechatronic system [1], where the designs are complemented in order to achieve a general objective. The present article describes the design process of an electronic system control for an automatic CNC lathe built with didactic purposes. An explanation of the operation of each of the components and the requests that guided the process of design is provided.

1 Ingeniero electrónico y de telecomunicaciones con especialización en gerencia de proyectos educativos. Docente e investigador de la Universidad Cooperativa de Colombia. Correo: howeimer@yahoo.com
2 Ingeniero electrónico con especialización en seguridad física y de la información. Docente e investigador de la Universidad Cooperativa de Colombia. Correo: juancarlosmartinez@hotmail.com

Key words

CNC lathe, discrete control, PID, compensation phase.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, un torno es una máquina-herramienta cuyo funcionamiento se da mediante un sistema mecánico de alta complejidad. Sin embargo, el desarrollo y perfeccionamiento de las técnicas de control electrónico pueden disminuir la complejidad mecánica mediante el reemplazo de engranajes por controladores electrónicos. Se habla de tres tipos de torno: torno de engranajes, torno revolver y torno automático CNC [2]. El presente trabajo se ocupa del diseño electrónico de un torno CNC de uso didáctico.

En este texto se describe el diseño electrónico de un primer prototipo de un minitorno automático de uso didáctico que obedece a comandos CNC, desarrollado por el Grupo de Investigación en Automatización Industrial (GIAI) de la Universidad Cooperativa de Colombia. En primera instancia, se procederá a detallar los requerimientos propios del sistema dinámico; en segunda instancia se definirán las variables a tener en cuenta para la selección del tipo de control; y, finalmente, se explicará el diseño electrónico y los resultados obtenidos.

1.1 DESCRIPCIÓN DE REQUERIMIENTOS

El proceso de torneado compromete tres movimientos básicos: 1. movimiento rotativo que se ejerce sobre el material a ser torneado. Debido al carácter didáctico de la herramienta a construir, el rango de operación de este movimiento oscila entre los 200 y los 4.000 RPM, lo que garantiza además un torque suficiente para el giro con carga; 2. un movimiento de profundidad, mediante el cual la herramienta de corte o buril penetra

el material a deformar, el cual debe manejar altos niveles de precisión; y 3. un movimiento de avance paralelo al material de trabajo. En la Figura 1 se muestran los movimientos requeridos para el sistema dinámico.

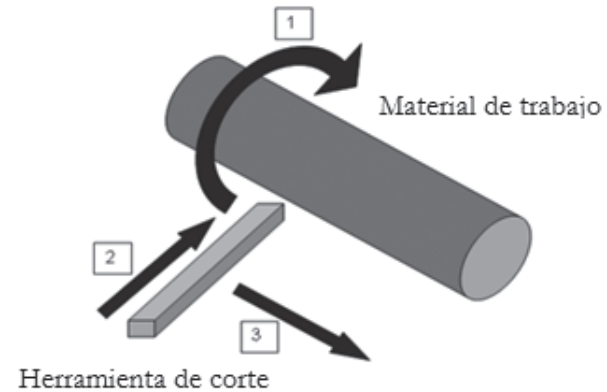


Figura 1. Movimientos en el proceso de torneado. Fuente: Grupo GIAI (UCC).

Tales movimientos han de concebirse mediante la utilización del sistema mecánico mostrado en la Figura 2.

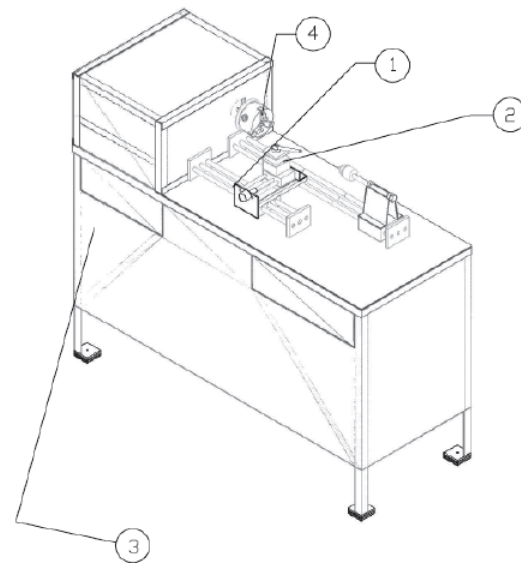


Figura 2. Conjunto general del torno didáctico. Fuente: GIAI (UCC).

2. METODOLOGÍA

El diseño y la construcción del sistema electrónico necesario para el torno didáctico se dividió en tres fases concretas: diseño e implementación del controlador del motor principal, diseño y construcción de los controladores de los motores transversal y longitudinal de los carros. Adicionalmente, se requiere un módulo maestro que sirva de interfaz con el PC y coordine el funcionamiento de las otras etapas. En la Figura 3 se muestra el esquema de bloques del sistema electrónico.

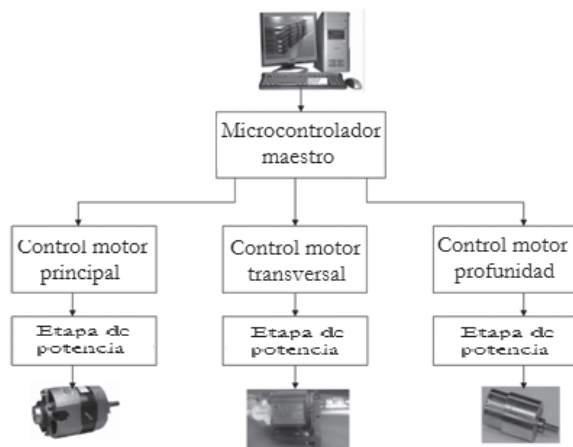


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema electrónico.
Fuente: Grupo GIAI (UCC).

2.1 CONTROLADOR DEL MOTOR PRINCIPAL

El control se diseñó de esta forma, debido a diversas condiciones favorables del efecto de compensación de adelanto de fase, como técnica de diseño que cumple con los requisitos del funcionamiento del torno. Algunas de estas condiciones fueron: la posibilidad de la reducción de los tiempos de levantamiento y asentamiento y el incremento del amortiguamiento al sistema en lazo cerrado [3].

Una vez definido el tipo de control a diseñar, se eligió como mecanismo de acción sobre el motor la modulación por ancho de pulso, debido a que se recomienda este tipo de acción para motores pequeños, como es el caso, y que además sea de imán permanente [4].

2.2 CONTROLADOR DEL MOTOR TRANSVERSAL

El motor transversal ha incorporado un controlador PID (proporcional integral derivativo) debido a que es el que mayor exigencia incorpora por su alta inercia en el adecuado funcionamiento del torno. En el PID, el efecto integral tiende a eliminar el error de estado estacionario, el efecto proporcional disminuye el tiempo de subida y la acción derivativa da estabilidad al sistema [5]. El componente electrónico del torno consta de cuatro etapas (Figura 3). Cada una de las tres etapas finales tiene una fase de potencia para el manejo de cada motor.

2.3 CONTROLADOR MOTOR DE PROFUNDIDAD

El motor de profundidad seleccionado como producto del sistema dinámico modelado es demasiado lento para el requerimiento del sistema y su respuesta transitoria es más veloz que la resolución del encoder. Por ello se optó por la implementación de un controlador *on / off*.

3. DISEÑO ELECTRÓNICO

En primera instancia, se diseñó una etapa de comunicación con el PC, la cual cuenta con un microcontrolador llamado "maestro", implementado sobre un PIC 16F877A. La interfaz con el PC se realiza con un conversor de RS-232 a TTL y se desarrollan líneas de comunicación con las etapas posteriores. El maestro cumple la función de recibir los comandos enviados mediante la in-

terfaz RS-232 del PC y distribuirlos a cada una de las etapas posteriores, supervisando y sincronizando el flujo de información desde y hacia las etapas conectadas a él. El flujo de información es enviado desde el PC con una trama con 8 bytes de control, que representan las velocidades, las posiciones y el sentido de giro de los motores a controlar como se indica a continuación :

MOTOR PRINCIPAL	{	• 1 BYTE VELOCIDAD
MOTOR TRANSVERSAL	{	• 1 BYTE VELOCIDAD • 2 BYTES POSICIÓN • 1 BYTE SENTIDO
MOTOR DE PROFUNDIDAD	{	• 2 BYTES POSICIÓN • 1 BYTE SENTIDO

El maestro monitorea si hay procesos en ejecución en las etapas de control de cada uno de los motores. Si es así, retrasa el envío hasta que estos hayan finalizado y se lo informa al PC. Para comunicarse con las etapas de control, el microcontrolador maestro cuenta con tres UART implementados por software. El módulo UART, que viene integrado en el microcontrolador (por hardware), es usado para la comunicación con el PC. Una vez distribuidos los datos en las etapas posteriores, el maestro queda pendiente de la recepción de nueva información.

4. CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR PRINCIPAL

El motor principal se muestra en la Figura 4. Es un motor AC/DC, marca General Electric modelo bd6222, con una potencia de 1,5 hp y una velocidad máxima de 14.000 rpm.

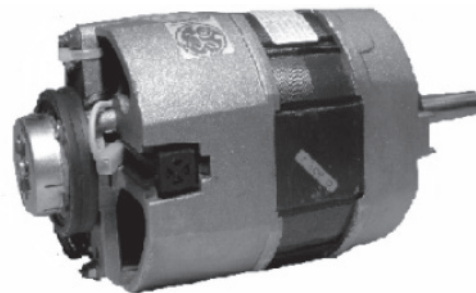


Figura 4. Motor principal o de giro de material.
Fuente: www.micromotores.com

4.1 CARACTERIZACIÓN

La respuesta en velocidad del motor principal corresponde a la respuesta de un sistema de primer orden. Esto obedece a que la inductancia de la armadura es cercana a cero [6].

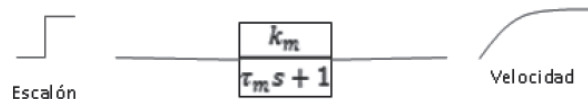


Figura 5. Caracterización en lazo abierto.
Fuente: adaptado de Analog and digital control system desing [6].

En la Figura 5, k_m corresponde a una ganancia constante del motor y τ_m , a la constante de tiempo de este. Un método para hallar estas constantes consiste en obtener la transformada inversa de Laplace de la función de salida del sistema. La entrada que se le ha suministrado a la planta es de tipo escalón, como se muestra en la ecuación 1. Por tanto, la salida en el dominio del tiempo corresponde a la mostrada en la ecuación 2.

$$W(s) = \frac{k_m}{\tau_m s + 1} \cdot \frac{a}{s} \quad (1)$$

$$W(t) = ak_m - k_m a e^{-t/\tau_m} \quad (2)$$

Se observa que cuando t tiende a infinito la velocidad tiende a ser como se presenta en la ecuación 3.

$$W(\infty) = k_m a \quad (3)$$

De esta forma, conociendo la magnitud de la entrada de escalón se conoce la constante k_m .

La constante de tiempo del motor puede hallarse a partir de la misma respuesta con la ecuación 4.

$$\tau_m = \frac{-t_0}{\ln\left(1 - \frac{w(t_0)}{w(\infty)}\right)} \quad (4)$$

Aquí, t_0 es un tiempo en el intervalo de estabilización del sistema. Los resultados de los cálculos para esta planta fueron: $\tau_m = 2,8$ y $k_m = 19$. Los resultados incluyen la carga del motor.

Las funciones de transferencia en el dominio S y en el dominio Z (con retenedor de orden cero) se muestran en las ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

$$W(s) = \frac{6,7857}{s + 0,3571} \quad (5)$$

$$W(z) = \frac{0,21591}{z - 0,9886} \quad (6)$$

En la Figura 6 se muestra la respuesta del sistema graficada en Matlab.

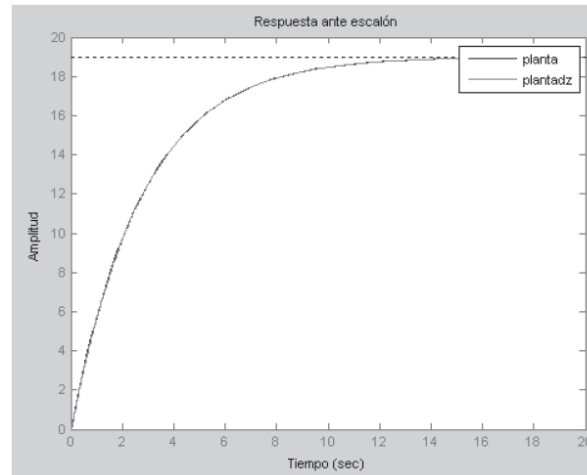


Figura 6. Representación de la caracterización en Matlab.

Se implementó un compensador digital en adelanto de fase sobre un microcontrolador 16F877A. Este compensador permite mejorar la respuesta transitoria del sistema y un buen grado de exactitud en el régimen permanente. El diagrama de bloques de este subsistema se muestra en la Figura 7.

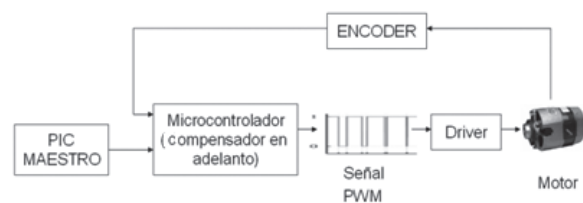


Figura 7. Diagrama de bloques, control motor principal.

El primer paso para el diseño del compensador es la caracterización del motor antes mencionada. Para este procedimiento se implementó un conversor de frecuencia voltaje sobre un microcontrolador PIC, usando un contador de pulsos externos, un temporizador para establecer el tiempo de muestreo y un conversor digital análogo del tipo R2R a la salida de uno de los puertos de 8 bits. El encoder fue diseñado para

entregar 50 pulsos por revolución. El tiempo de muestreo empleado fue de 30 ms, en el cual el microcontrolador toma un número determinado de pulsos de la salida del encoder. El número de revoluciones por minuto máximo se determinó en 5.500 (con un voltaje de alimentación del motor de 30 VDC). Con este número de revoluciones se obtienen 5 V a la salida del conversor digital análogo. Si el número de rpm disminuye, este voltaje también lo hará. El resultado de la caracterización se muestra en la Figura 8. De esta señal (observada en un osciloscopio) se obtiene la función de transferencia de esta planta.

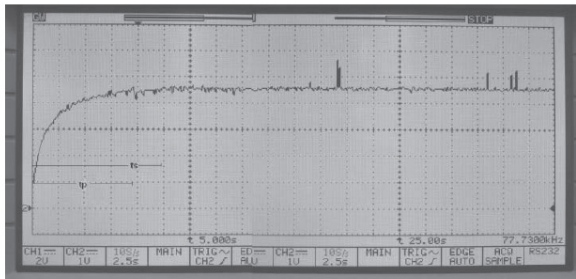


Figura 8. Respuesta a una entrada escalón del motor principal.

Una vez obtenida la función de transferencia, se procede al diseño matemático del compensador en el dominio Z , usando el método del lugar geométrico de las raíces. Este controlador permite dar al motor estabilidad en la velocidad asignada por el usuario. La ecuación 7 es la ecuación característica del compensador. El resultado final es una ecuación de diferencias que define completamente el compensador.

$$GD(z) = K \frac{z - \alpha}{z + \beta} \quad (7)$$

El diseño final del control de velocidad del motor principal cuenta con una entrada desde el PC para

establecer la velocidad de giro en rpm (set point). Este dato pasa al microcontrolador maestro y es enviado en forma serial mediante el módulo UART al PIC de control. La acción de control del compensador se realiza mediante el módulo PWM del mismo microcontrolador. La salida de este módulo alimenta un transistor de potencia, que finalmente realizará el swicheo en la alimentación del motor. El lazo de realimentación está formado por el encoder antes mencionado, el cual entrega una cantidad determinada de pulsos al microcontrolador durante el tiempo de muestreo. Luego de este tiempo, el microcontrolador calcula el error y ejecuta el programa que contiene la ecuación de diferencias y entrega como resultado la modificación necesaria del ancho del pulso.

La siguiente etapa del sistema electrónico es el control de velocidad y posición del motor transversal. La respuesta en posición a una entrada escalón del sistema de avance corresponde a una planta de segundo orden, debido a que la posición es la integral de la velocidad. El diagrama de bloques para la caracterización del motor en lazo cerrado se puede observar en la Figura 9.

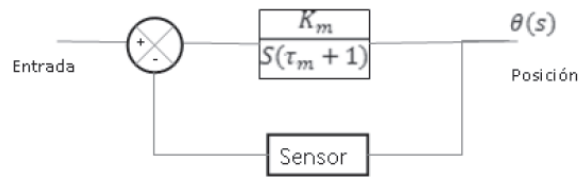


Figura 9. Sistema en lazo cerrado para la caracterización del motor.

En este caso, se obtienen experimentalmente los tiempos de sobrepaso y tiempo de establecimiento a fin de hallar una función de transferencia característica para sistemas de segundo orden, como se ve en la ecuación 8.

$$Gs(s) = \frac{\omega n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega n \cdot s + \omega n^2} \quad (8)$$

El resultado de la medición de los tiempos fue: $t_p = 1,75$ s y $t_s = 5,75$ s. Se hallaron las constantes del sistema, lo que dio como resultado los valores mostrados en las ecuaciones 9 y 10.

$$\xi = 0,3613 \quad (9)$$

$$\omega_n = 1925,35 \text{ rad} / \text{s} \quad (10)$$

Finalmente, la función de transferencia de la planta se muestra en la ecuación 11.

$$G(s) = \frac{3.707}{s^2 + 1.39s + 3.707} \quad (11)$$

En el dominio Z con retenedor de orden cero tendremos la función de transferencia de la ecuación 12.

$$G(z) = \frac{0.0018695(z + 0.9653)}{z^2 - 1.958z + 0.9568} \quad (12)$$

La respuesta en Matlab para la planta en los dominios S y Z se muestra en la Figura 10.

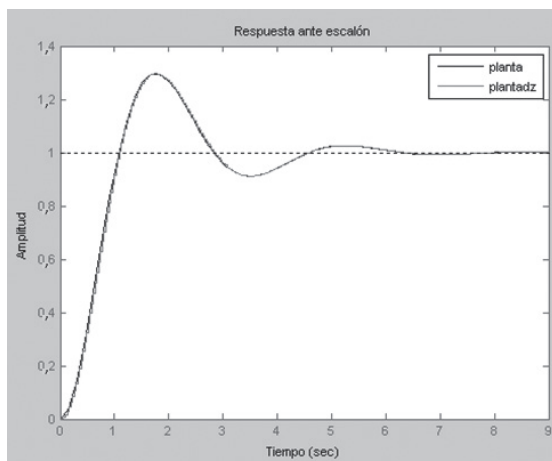


Figura 10. Simulación de la curva característica del motor.

El controlador usado para esta etapa es un PID digital. La utilización de este controlador compensa las perturbaciones mecánicas que puedan presentarse, los tiempos muertos y mejora la estabilidad del sistema. Se presenta el correspondiente diagrama de bloques en la Figura 11.

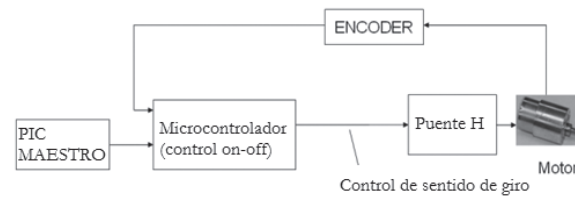


Figura 11. Diagrama de bloques, control motor transversal.

El motor utilizado es un DC marca Minertia, modelo UGJMEE-02XIB12, con una velocidad de 500 rpm y contiene un encoder integrado de 900 ranuras. El procedimiento de caracterización del motor se realizó de forma similar al realizado para el motor principal, con la diferencia de que el DC marca Minertia fue caracterizado con carga, es decir, empotrado en el sistema de movimiento transversal. Luego de la obtención de la función de transferencia, se procede a pasar la función al dominio Z y al cálculo matemático de las constantes k_p , k_i y k_d . En el dominio del tiempo se tendría la ecuación 13 para el PID [7]:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

La implementación del controlador se realiza sobre un PIC 18F452, utilizando un algoritmo cíclico que permite aplicar las tres acciones de control. En el dominio Z el PID se representaría con la ecuación 14.

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_1 + \frac{K_2 Tz}{z-1} + K_3 \frac{(z-1)}{Tz} \quad (14)$$

El algoritmo de la ecuación en diferencias para el controlador PID se muestra en la ecuación 15.

$$u(k) = K_1 x(k) + K_2 [u(k-1) + T x(k)] + \left(\frac{K_3}{T}\right) [x(k) - x(k-1)], [1] \quad (15)$$

El lazo de realimentación del sistema está dado por un encoder que tiene el motor dentro de su estructura. La señal de este encoder se realimenta a uno de los contadores de pulsos que tiene el microcontrolador, haciendo un muestreo periódico y permitiendo que con cada señal de realimentación se ejecute el algoritmo de control PID. El encoder permite establecer no sólo la posición del carro que maneja el motor, sino también la velocidad (la segunda es derivada de la primera). El PID entrega una salida digital por uno de los puertos del microcontrolador. Esta salida es convertida en analógica y amplificada, de lo que se obtiene una señal variable en voltaje, que es usada como alimentación de la planta en cuestión. Como resultado se observa que hay un retraso en el tiempo de respuesta del sistema, que hace que sea exacto y preciso. El sentido de giro del motor se controla con dos pines del microcontrolador mediante un puente *H*.

La velocidad y la posición deseadas son establecidas por el software en el PC y llegan a este controlador mediante comunicación UART con el PIC maestro. Una vez llega esta información, se establece el error y comienza el procedimiento cíclico de control. Al terminar el proceso, el 18F452 informa al maestro que está a la espera de nuevas instrucciones.

La última etapa corresponde al control de posición del motor de profundidad (Figura 12).

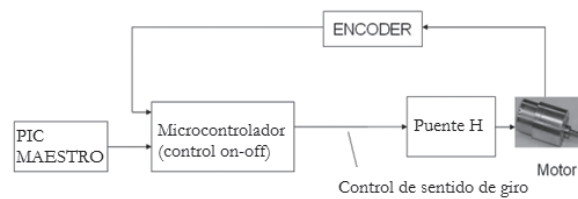


Figura 12. Diagrama de bloques, control motor de profundidad.

Una vez más se emplea un motor DC, en este caso con una caja reductora que permite una velocidad de 8 rpm. Su consumo es de 50 mA libres. El motor se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Motor de profundidad.

Al sistema de movimiento longitudinal se le implementó un encoder lineal que cuenta con 900 ranuras a lo largo de 16 cm, lo que permite un avance mínimo de 0,17 mm.

La acción de control a implementar sobre esta planta es de tipo *on / off*, debido a que el motor es lo suficientemente lento para el requerimiento del sistema y su respuesta transitoria es mas veloz que la resolución del encoder. Esto quiere decir que antes de que el sensor entregue un pulso, el motor ya se encuentra en estado estable, por tanto puede girar o detenerse si se le da la orden, antes de sobrepasar una ranura del encoder. El control se implementó sobre un microcontrolador PIC 16f877A.

De manera similar a los motores anteriores, este recibe los valores deseados del maestro vía UART, lo que hace posible establecer un valor de error con el fin de detener el motor cuando se alcance la posición deseada ($\text{error} = 0$). En este caso, la etapa de potencia está conformada solamente por un puente H controlado directamente por el microcontrolador.

5. CONCLUSIÓN

Algunas de las conclusiones generadas a partir de la experiencia del diseño electrónico son, en primera instancia, la flexibilidad y la integralidad de los componentes, ya que los microcontroladores actuales tienen incorporados módulos que permiten el desarrollo de este tipo de sistemas de control. Además, cuentan con una alta precisión en los tiempos de adquisición y entrega de datos.

El diseño matemático de controladores discretos es una herramienta de gran utilidad para la implementación de sistemas de control en una amplia gama de dispositivos. En las experiencias descritas aquí, el control se hace directamente sobre el PC de escritorio, ya que envía los *set points* a los microcontroladores. Por otra parte, cuenta con un desarrollo más económico en cuanto a componentes.

Quedan como mejoras y nuevos desarrollos la integración en un solo DS PIC del sistema electrónico de control, utilizando y optimizando los módulos temporizadores y PWM que están disponibles en el circuito integrado del DS PIC. También se detectó la necesidad de hacer un sistema automático de caracterización de motores que entregue de una vez la función de transferencia de la planta.

REFERENCIAS

- [1] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Sistemas de control moderno*, 10ª ed. Madrid: Prentice Hall, 2005, pp. 19 -20.
- [2] S. F. Krar y A. F. Check, *Tecnología de las máquinas-herramienta*, 5ª ed. México: Alfaomega, 2002, p. 335.
- [3] B. C. Kuo, *Sistemas de control automático*, 7ª ed. México: Prentice Hall, 1996, p. 736.
- [4] T. J. Maloney, *Electrónica industrial moderna*, 3ª ed. México: Prentice Hall, 1997, pp. 671-672.
- [5] D. Ibrahim, *Microcontroller based applied digital control*. Department of Computer Engineering, Near East University, Cyprus: John Wiley & Sons, 2006, pp. 230 -234.
- [6] C. Chi-Tsong, *Analog and digital control system desing*. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [7] Controladores PID [práctica de laboratorio], Área de Automatización y Control Industrial, Universidad Nacional de Quilmes.