

## Diseño y construcción de un sistema de control de micropasos usando modulación de ancho de pulso

### Design and construction of a microstepping control system using pulse width modulation

Rodríguez Ángeles, Eduardo \*; Pérez Merlos, Juan Carlos; Vilchis González Adriana

División de Posgrado, Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma del Estado de México

Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Edo. de México, México  
eduroan@yahoo.com\*

#### Resumen

*En el área de robótica el uso de motores como actuadores es muy frecuente. Existen motores de corriente alterna, corriente continua y motores denominados a pasos, éstos giran de manera discreta y no continua como los otros. Un motor a pasos se caracteriza principalmente porque su rotor se desplaza angularmente una determinada cantidad de grados cuando se le aplica un pulso de tensión en sus bobinas (paso del motor), y por lo tanto no requiere una retroalimentación para saber la posición que guarda ni tampoco un dispositivo de frenado. Una de sus limitaciones es el tamaño del paso para el que están diseñados: el paso más pequeño que se puede encontrar comercialmente es de  $0.9^\circ$ . En el presente trabajo se muestra el diseño y construcción de un sistema de control de micropasos para aumentar la resolución, es decir disminuir el paso del motor. Dicho sistema cuenta con una interfaz de usuario implementada en Visual Basic que recibe las consignas, éstas son enviadas a un microcontrolador PIC16F877A, el cual determina la cantidad de corriente que se debe suministrar a las bobinas del motor a través de la técnica de modulación de ancho de pulso (PWM). El resultado obtenido es un sistema capaz de controlar el sentido de giro, el posicionamiento y la velocidad angular de tres motores a pasos de manera simultánea, y con valores independientes para cada motor, con un micropaso de  $0.225^\circ$ .*

**Palabras Claves:** motor a pasos, aplicación PWM, microcontrolador, control de micropasos

#### Abstract

*The use of motors such as actuators is very common in the area of robotics. There are AC and DC motors, and the so called step motors, these revolve in discrete way and no continuous as the others. A step motor is mainly characterized because its rotor moves angularly a certain amount of degrees when applies a pulse of voltage in their bobines (step of the motor), and therefore does not require a feedback to know its actual position and does not require a braking device. One of its limitations is the size of the step for which they are designed:  $0.9^\circ$  is the smallest step that can be found commercially. The present work shows the design and construction of a microstepping control system to increase the resolution, i.e. to reduce the step of the motor. This system has a user interface implemented in Visual Basic that receives instructions, these are sent to a PIC16F877A microcontroller, which determines the amount of current to be supplied to the bobines of the motor using a Pulse Width Modulation technique (PWM). The result is a system capable of controlling the sense of rotation, positioning and the angular velocity of three motors simultaneously, and with independent values for each motor, with a microstep of  $0.225^\circ$ .*

**Key words:** step motor, PWM application, microcontroller, microstepping control.

## 1 Introducción

Recientemente, los motores a pasos han incrementado su popularidad en sistemas de control de movimiento de diferentes áreas debido a su simplicidad y confiabilidad. Por ejemplo, en el área de instrumentación analítica bioquímica ha aumentado su uso debido a su alta precisión en el control de la posición.

Los motores a pasos se pueden controlar tanto usando algoritmos de lazo abierto como de lazo cerrado, el primer tipo de algoritmo es el comúnmente usado, debido a que es barato y no requiere de retroalimentación ni usa encoders (Carrica et al., 2003; Le & Jeon, 2007).

Existen dos modos de control de los motores a pasos, el primero es a través del voltaje y el segundo es controlando la corriente, este último es el más usado en sistemas de control de alta precisión (Zhang et al., 2005). Hay dos maneras para controlar la corriente en el motor a pasos, una es ajustando el ciclo de trabajo (duty cycle) del pulso de conmutación usando un convertidor digital-analógico (DAC) y un comparador analógico (Zhang et al., 2005), y otra es usando un convertidor analógico-digital (ADC) y una muestra regular para ajustar el ciclo de trabajo del pulso de conmutación (Blaabjerg et al., 1999).

Básicamente, los motores a pasos se clasifican dependiendo de la configuración del rotor y del estator. De acuerdo a la configuración del estator los motores a pasos se clasifican en bipolares y unipolares, depende de la conexión que tengan las bobinas y del sentido de la corriente que puede haber por cada una de ellas. En el caso de los motores unipolares, se cambia la bobina excitada, mientras que en los bipolares se hace un cambio en el sentido de la corriente que fluye por los devanados del motor. Y de acuerdo al rotor se clasifican en motores de reluctancia variable, de imán permanente e híbridos (Gómez Pazmin et al., 2003).

Un motor a pasos se caracteriza principalmente porque su rotor se desplaza angularmente una determinada cantidad de grados cuando se le aplica un pulso de tensión en sus bobinas, a este desplazamiento angular se le llama paso del motor. El paso de un motor a pasos depende de la construcción física del motor y, por lo tanto, tiene un valor fijo para un motor en particular. La alimentación de tensión no se puede aplicar de forma arbitraria, sino que debe ser aplicada de una forma especial para lograr la rotación, por lo tanto la posición angular del motor es función de los pulsos de tensión aplicados en sus bobinas. La posibilidad de controlar en todo momento estas entradas permite realizar desplazamientos angulares precisos de hasta  $0.9^\circ$ , dependiendo del tipo de motor y de la forma de codificación, en cualquiera de las dos posibles direcciones: izquierda y derecha.

Por lo anterior, un motor a pasos es idóneo cuando se presenta una aplicación en la cual se tiene que girar el rotor a ciertas posiciones, y en las cuales debe permanecer hasta que haya una nueva señal que lo lleve a otra posición. Debido a esto, con un motor a pasos se elimina la necesidad de

usar mecanismos de frenado para conservar la posición, de tal forma que para controlar la posición angular sólo se necesita calcular cuántos pasos se requieren para lograr la posición deseada, y así poder generar los pulsos de entrada correspondientes. Para poder hacer esto, se debe saber cuántos grados gira el rotor por pulso (paso del motor), o bien cuántos pasos necesita dar el rotor para dar una vuelta de  $360^\circ$  (resolución del motor) (Remiro et al., 2006).

Así como se puede controlar la posición angular de un motor a pasos, también es posible controlar su velocidad angular, debido a que ésta es función directa de la frecuencia de variación de los pulsos de entrada. Para controlar la velocidad angular de un motor a pasos se debe controlar la frecuencia de los pulsos de tensión aplicados en sus bobinas.

Tradicionalmente, existen cuatro técnicas para controlar un motor a pasos: la de paso completo, medio paso, fase simple (comúnmente no usada) y la de micropasos. El control a paso completo hace que el motor gire un paso por cada pulso de alimentación, mientras que el de medio paso sólo gira la mitad de un paso por pulso de alimentación. Por lo anterior, las posiciones que se pueden obtener son múltiplos enteros del paso para el control a paso completo, y múltiplos enteros de la mitad de paso para el control a medio paso. Esto significa que existen posiciones que no pueden ser logradas por el motor, lo cual ya es una limitante cuando se requiere gran precisión en alguna aplicación. Otra característica que tienen estos métodos de control es que los movimientos del motor son bruscos, debido a que las entradas son secuencias de pulsos.

Sin embargo, existe otra técnica de control llamada control a micropasos, con la cual se suavizan los movimientos del motor y se logra aumentar su resolución, es decir se logra disminuir el paso del motor (Valvano, 2007). Esta técnica se basa en controlar la corriente que se suministra a las bobinas del motor, de tal manera que dichas entradas asemejen excitaciones sinusoidales escalonadas de corriente con un defasamiento entre sí de  $90^\circ$ . Bajo estas condiciones, a cada escalón de las entradas, el rotor se va a ubicar en una posición de equilibrio, como se muestra en la Fig. 1 y Fig. 2. Esta posición es el resultado del equilibrio de los dos campos magnéticos generados por las bobinas, i.e. es la combinación de ambas corrientes. De esta forma, el motor habrá dado un avance de un micropaso, ver Fig. 3.

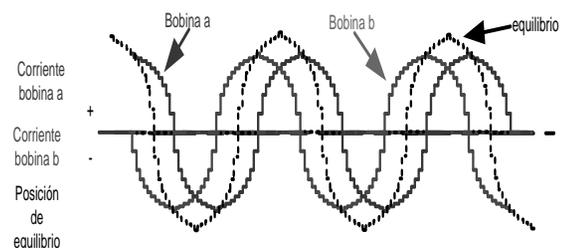


Fig. 1. Corrientes de las bobinas y posición de equilibrio de un motor a pasos bipolar en el control a micropasos

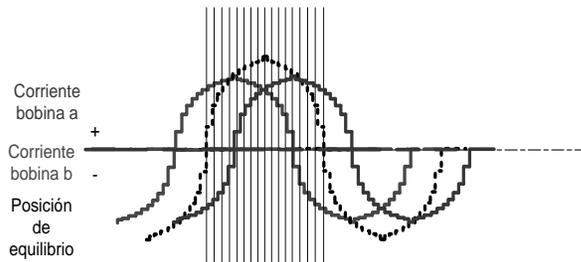


Fig. 2. División de un pulso de paso normal en micropasos

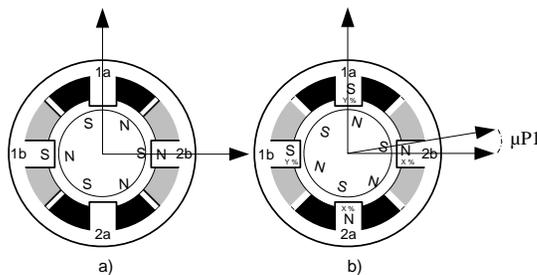


Fig. 3. Avance del rotor de un micropaso

Para lograr una alimentación de tipo senoidal, se puede hacer uso de la modulación de ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation) (Condit & Jones, 2004). El PWM consiste en aplicar varios pulsos de corriente por segundo a las bobinas del motor, al variar la anchura de dichos pulsos se controla la cantidad de corriente que se aplica, mientras más ancho sea el pulso mayor será la cantidad de corriente que se aplica. Sin embargo, hay un inconveniente: conforme aumenta la velocidad (frecuencia) en que se generan los pulsos, éstos disminuyen en su duración, es decir tienen un menor ancho de pulso. Esto significa que disminuye la cantidad de corriente por pulso, por lo que el motor a pasos disminuye su torque, i.e. el torque de un motor a pasos es inversamente proporcional a la frecuencia del PWM (Gómez Pazmin et al., 2003).

A pesar de lo anterior, en algunas aplicaciones este tipo de control puede incrementar la eficiencia del proceso, reducir la complejidad del sistema y su costo. Comparando las técnicas de paso completo y medio paso con la de micropasos, ésta puede usarse para resolver problemas de ruido y resonancia, además de incrementar la resolución (Gómez Pazmin et al., 2003). Cabe mencionar que la electrónica necesaria para implementar la técnica de control a micropasos es más compleja que la requerida para aplicar las técnicas a medio paso y paso completo.

En este sentido, Gómez Pazmin et al. (Gómez Pazmin et al., 2003) describen un sistema de control de micropasos usando el método seno y coseno. Para ingresar los parámetros de conexión (sentido de giro y cantidad de corriente del motor) el sistema incluye una interfaz en Visual Basic, o bien se pueden ingresar directamente vía un teclado. Cabe

mencionar que es difícil conocer, para un usuario promedio, el valor de la corriente. La propuesta utiliza dos microcontroladores, uno para el control y otro para obtener datos de retroalimentación, y se obtiene un micropaso de  $0.45^\circ$ .

Ocotitla Hernández & Jaramillo Torres (Ocotitla Hernández & Jaramillo Torres, 2009) desarrollaron una tarjeta controladora de motores a paso completo y a medio paso basándose en un autómata finito. Esta propuesta usa un microcontrolador, y para la etapa de potencia usa transistores individuales. Al sistema se le pueden conectar dos motores a la vez, pero no pueden funcionar al mismo tiempo, y si se desea un tercer motor se requiere añadir software y circuitería adicional.

Patel et al. (Patel et al., 2010) realizaron un control de micropasos usando la técnica PWM para un motor de rotor tipo disco. El sistema utiliza un microcontrolador TMC401 y como controlador de la corriente un TMC239. Las direcciones para el motor se ingresan a través de interruptores y la velocidad se ajusta por medio de una resistencia variable. El sistema divide hasta en  $1/32$  el paso del motor.

Zhang et al. (Zhang et al., 2005) mencionan la construcción de un control de micropasos usando un FPGA. Los autores usaron la técnica de división del flujo constante con una frecuencia de 12.8 Hz, implicando que la velocidad del motor no debe ser menor a  $77.8 \mu\text{s}$ . Para el manejo de la comunicación con la computadora utilizaron un microcontrolador 8051 y como controlador de la corriente un 1298. El sistema puede controlar hasta tres motores con una reducción de  $1/10$  del paso del motor.

En contraste a los trabajos anteriormente citados, este artículo presenta un sistema capaz de controlar hasta tres motores a pasos simultáneamente, con especificaciones de sentido de giro, posicionamiento y velocidad angular de valor independiente para cada motor, y aplicando una técnica de PWM para la generación de micropasos para obtener un micropaso de  $0.225^\circ$ . Este sistema utiliza una interfaz desarrollada en Visual Basic para el ingreso de los parámetros de los motores a pasos y un microcontrolador PIC16F877A para generar el PWM.

## 2 Sistema de control de micropasos

Para el diseño y construcción del sistema de control de micropasos utilizando PWM se siguió la siguiente metodología:

- Investigar y analizar la información existente acerca de los motores a pasos y sus formas de control.
- Investigar y analizar la técnica de micropasos y la modulación PWM.
- Realizar una propuesta a bloques de las partes del sistema de control de micropasos.
- Seleccionar los posibles componentes eléctricos, electrónicos y ambiente de trabajo para el sistema de control de micropasos.
- Diseñar y construir los bloques propuestos de acuerdo a

los componentes seleccionados.

- Desarrollar la programación tanto para el microcontrolador como para la computadora.
- Realizar pruebas de funcionalidad del equipo, así como de los programas y de los elementos finales.

El sistema de control de micropasos en su totalidad consta de tres partes primordiales: una interfaz de usuario, un sistema de control, y un circuito de potencia, como se muestra en la Fig. 4.

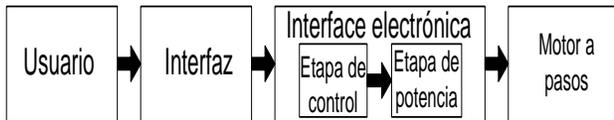


Fig. 4. Diagrama a bloques del control de un motor a pasos

Para el desarrollo de este sistema se usaron tres motores a pasos de la marca Tol-O-matic, el primero modelo MRS 231, el segundo MRS 171, y el tercero MRS 232, todos ellos motores bipolares de alimentación a 12V, con consumo de corriente no mayor a 3A, y con un paso de 1.8°. Y, para la comunicación entre la interfaz de usuario y la etapa de control se seleccionó el puerto serial.

La interfaz de usuario fue realizada en una computadora utilizando el lenguaje Visual Basic. Esta interfaz tiene las funciones de: seleccionar y configurar el puerto serial, recibir las consignas de velocidad, posición y sentido de giro, así como el número de motor que se desea manejar, y enviar dichas consignas a la etapa de control, como se observa en la Fig. 5

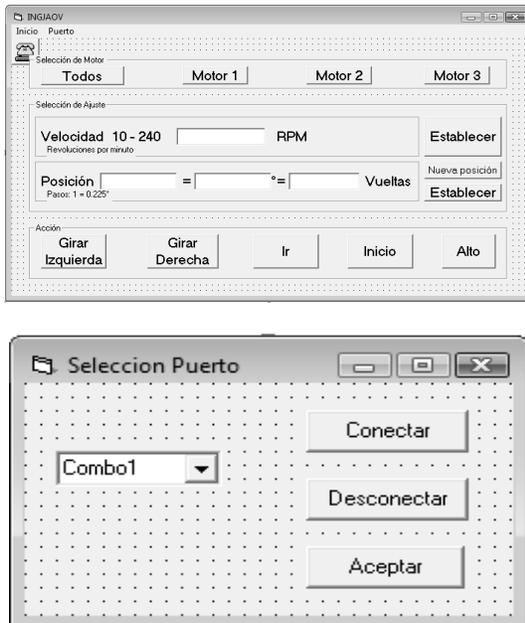


Fig. 5. Interfaz de usuario: a) Pantalla principal, b) Pantalla de selección de puerto

En la comunicación serie entre la computadora y el circuito de control se utilizó un dispositivo MAX 232-C, el cual es un dispositivo que realiza el cambio de voltajes de entre 12V, de la norma RS232C en la computadora, a 0V y +5V del microcontrolador.

La etapa de control tiene las funciones de: recibir las consignas ingresadas por el usuario a través de la interfaz de Visual Basic, generar las salidas PWM requeridas para el control del motor a pasos, y enviar dichas salidas PWM a la etapa de potencia.

El circuito de control consiste básicamente en un microcontrolador de gama media de Microchip, el PIC16F877A. Este dispositivo fue seleccionado debido a las prestaciones que tiene y en función de los requerimientos del sistema a desarrollar. De manera general, este dispositivo cuenta con 8 kb de memoria de programa, 368 registros de propósito general (característica de los procesadores RISC de tener muchos registros internos), cinco puertos ó 33 pines de entrada/salida, memoria Flash, módulo de PWM, comparadores, temporizadores, módulo ADC, y un dispositivo de comunicación serial USART.

El PIC16F877A utiliza unas tablas de los valores de las ondas seno y coseno, que tiene almacenadas en su memoria y que se pueden observar en la Fig. 6, para generar los PWM. Dependiendo de las consignas recibidas, selecciona de dichas tablas los valores requeridos para satisfacer esas consignas. Posteriormente envía los valores seleccionados a los registros CCP1 y CCP2 del microcontrolador, para así establecer el ciclo de trabajo y transformarlo en voltaje (generar los PWM). Finalmente, los PWM son enviados a la etapa de potencia.

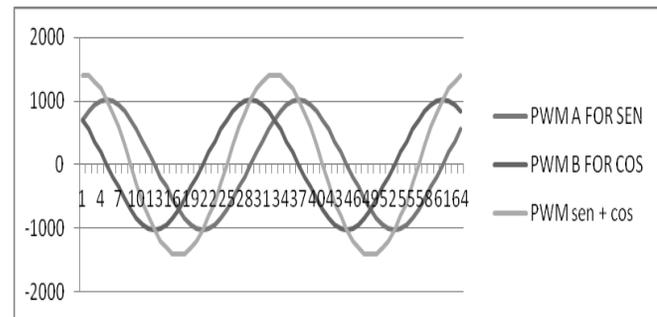


Fig. 6. Representación gráfica de los valores para la generación del PWM

La programación del microcontrolador fue realizada en el lenguaje C de CSS, en el ambiente de desarrollo MPLAB versión 7.6 de Microchip, y para grabar el chip se utilizó el MPLAB ICD 2 de la misma marca. Las funciones que realiza el programa de la etapa de control son: configuración del puerto serial, configuración de los puertos de entrada/salida, así como de los registros que involucran la modulación PWM, como son los registros CCP1 y CCP2. Del puerto B del microcontrolador se usaron los pines PB1 y PB2 para la

dirección del motor, y los pines PB4 y PB5 para habilitación. Del puerto C se utilizaron los pines PC1 y PC2 para las salidas PWM que alimentan, respectivamente, a las bobinas A y B del motor, y los pines PC6 y PC7 para la comunicación serie.

La etapa de potencia tiene las funciones de: recibir los PWM generados por la etapa de control, y suministrar la energía necesaria, de acuerdo a dichos PWM, a las bobinas A y B, para así lograr que los motores a pasos trabajen de acuerdo a las especificaciones dadas por el usuario.

El circuito de potencia está unido al microcontrolador a través de los drivers CI TC4468 y CI TC4469 que sirven de acoplamiento. Esta etapa está constituida por dos puentes H, uno por cada bobina del motor a pasos, para así poder realizar el cambio de sentido de giro del mismo. Cada puente H está implementado con cuatro transistores de potencia MOSFET IRL2703A. La conmutación de estos transistores permite que fluya corriente en las bobinas del motor a pasos en un sentido y en otro. En este caso, trabajan como interruptores controlados por el microcontrolador: los transistores Q1 y Q4 al mismo tiempo y luego los transistores Q2 y Q3, como se muestra en la Fig. 7.

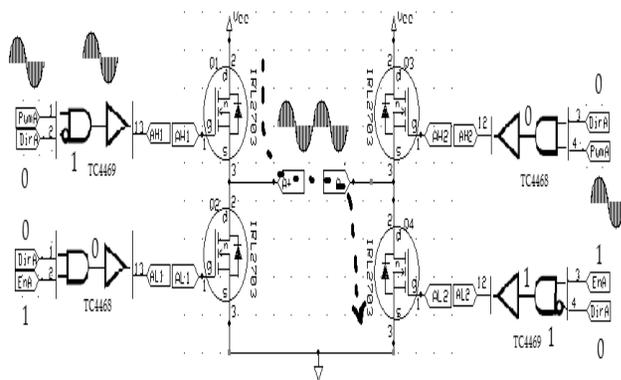


Fig. 7. Flujo de corriente de la bobina A del motor en sentido positivo

La anterior descripción de las etapas de control y potencia corresponden a los circuitos necesarios para manejar un motor a pasos, por lo que se realizaron tres tarjetas de potencia y de control, para así poder manejar los tres motores, propuestos al inicio del trabajo, al mismo tiempo. El diseño de los circuitos impresos fue realizado con el software libre de Eagle, y su construcción, debido a la gran cantidad de pistas, fue realizada en placas fenólicas de doble cara. Cabe mencionar que también se realizaron dos fuentes de alimentación: una de 5V para el circuito de control, y otra de 12V para la etapa de potencia. En la Fig. 8 se muestran las tarjetas de control y potencia para un motor a pasos, y en la Fig.9 se muestra el ensamble de las mismas.

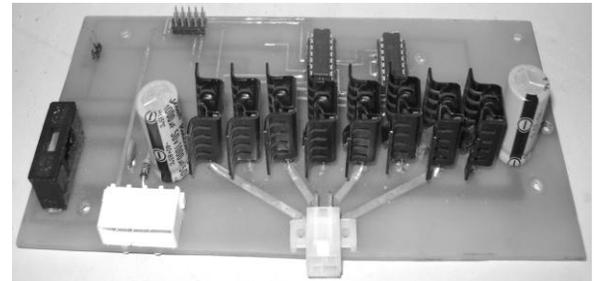
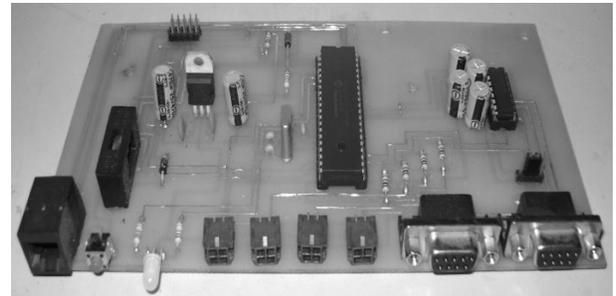


Fig. 8. Circuitos impresos: a) Etapa de control, b) Etapa de potencia

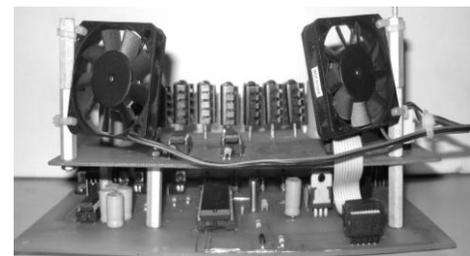
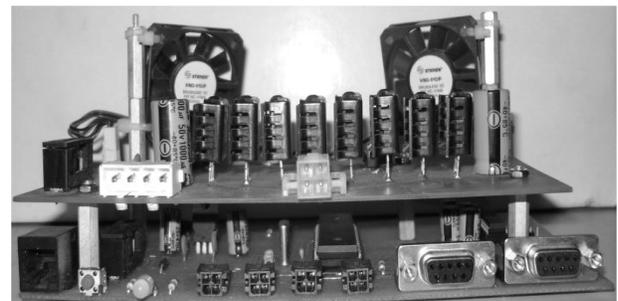


Fig. 9. Ensamble de las etapas de control y potencia: a) Vista frontal, b) Vista posterior.

### 3 Pruebas y resultados

Inicialmente, las pruebas se fueron realizando parte por parte, para después realizarse una prueba con todas las partes integradas. Las primeras pruebas de los circuitos de control y de potencia fueron en un protoboard, observándose problemas de falsos contactos y una complejidad considerable en el armado, por lo que se procedió a diseñar un circuito impreso de prueba. Además, las primeras pruebas se realizaron utilizando la HyperTerminal de Windows, en la cual

se desplegaba un menú de opciones, con el objetivo de verificar el funcionamiento del motor y del circuito electrónico y de los cálculos para el programa del PIC.

Las pruebas realizadas en el circuito impreso mostraron que los MOSFET, utilizados en el puente H, presentaban un calentamiento excesivo al trabajar a bajas frecuencias de conmutación, llegando incluso al grado de su destrucción. Esto se debía a que la conmutación no se realizaba lo suficientemente rápido, i.e. que tanto la rampa de subida como la de bajada de la tensión eran muy inclinadas, en vez de ser completamente verticales. Por ello, el MOSFET producía una disipación de energía, que es la que hacía que se calentara excesivamente. Esto se solucionó incorporando disipadores de calor a los MOSFET y adicionando un par de ventiladores al circuito. Otro problema que se presentó fue una pérdida de sincronización (rotor frenado, en vibración o con giro errático) al trabajar a altas frecuencias de conmutación, debido a que se provocaba una velocidad de giro del campo magnético del estator muy grande, por lo que el rotor no era capaz de alcanzar dicha velocidad. Estos problemas, a bajas y altas frecuencias de conmutación, se solucionaron por programación fijando un límite máximo (240 rpm) y un límite mínimo (10 rpm) de velocidad del motor, mismos que fueron determinados de forma experimental.

Debido a que la velocidad del motor se establece mediante la programación y está basada en cálculos, para probar el control de posición del sistema desarrollado se utilizó un optoacoplador empotrado a una base fija a un costado del estator del motor a pasos y una lámina de corte de señal, como se observa en la Fig. 10.

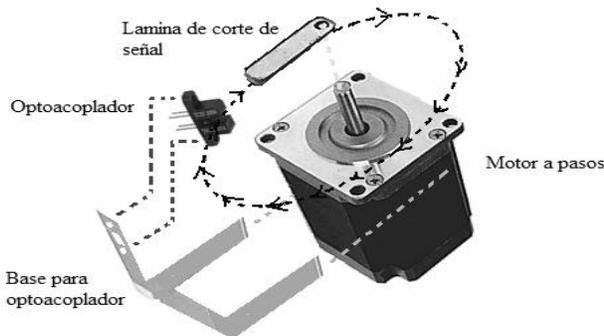


Fig. 10. Piezas necesarias para las pruebas de posicionamiento del rotor

Sin estar energizado el motor se determinó e indicó la posición inicial cero dada por el optoacoplador y la lámina de corte de señal. Después, mediante el sistema desarrollado, se hizo girar el motor a una velocidad fija hasta que la lámina de corte de señal cruzara enfrente del optoacoplador (posición final). En ese instante se desenergizó el motor, y la interfaz de usuario desplegó la cantidad de micropasos que el rotor tuvo que dar para alcanzar dicha posición final a partir de la posición inicial, que de hecho son la misma, i.e. el motor dio un giro de  $360^\circ$ . Esta prueba se realizó a

diferentes velocidades, obteniéndose un resultado satisfactorio: 1600 micropasos para dar una vuelta de  $360^\circ$  (resolución), i.e.  $0.225^\circ$  de desplazamiento por pulso (micropaso).

La verificación del control de sentido de giro se hizo visualmente utilizando el motor con la lámina acoplada: primero se le hizo girar en un sentido lentamente, y después se le ordenó el cambio de giro a una velocidad también lenta.

Finalmente, se probó el sistema con los tres motores a pasos trabajando simultáneamente, pero con valores de sentido de giro, posición y velocidad angular diferentes para cada motor, obteniéndose resultados satisfactorios.

#### 4 Conclusiones

El sistema desarrollado cumple con el objetivo propuesto: permite controlar hasta tres motores a pasos simultáneamente, con consignas de sentido de giro, posicionamiento y velocidad angular de valor independiente para cada motor, con un micropaso de  $0.225^\circ$  obtenido mediante una técnica de PWM para la generación de micropasos.

Los motores a pasos bipolares, que puede controlar el sistema, deben tener una alimentación de 12V, un consumo de corriente no mayor a 3A y una resolución de 200 pasos por vuelta (i.e. un paso de  $1.8^\circ$ ), de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

Se requiere una computadora con sistema operativo Windows y con un puerto de comunicación serie, ya que la interfaz de usuario desarrollada trabaja bajo esa plataforma y la interconexión entre la computadora y el circuito electrónico se hace por medio de un cable de comunicación serial.

Finalmente, la técnica de micropasos para el control de un motor a pasos puede ser implementada mediante un microcontrolador, utilizando software y sus aplicaciones de PWM, a un costo accesible. El costo de este proyecto fue de \$1500 MXN para construir el circuito de control y potencia para un motor a pasos, i.e. fue de \$4500 MXN para controlar los tres motores a pasos propuestos.

#### Referencias

- Blaabjerg, F, P.C. Kjaer, P.O. Rasmussen, and C. Cossar, 1999, Improved digital current control methods in switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 14, No. 3, pp. 563-572.
- Carrica, D, M.A. Funes, and S.A. González, 2003, Novel stepper motor controller based on FPGA hardware implementation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, No. 1, pp. 120-124.
- Condit, R. and D.W. Jones. Stepping motors fundamentals. Microchip Application Note: AN907, Microchip. 2004. Se encuentra en <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00907a.pdf>. Fecha de consulta: 06 Agosto 2012.
- Gómez Pazmin, O.M., R.A. Albornoz Cañizales, and C.A.

López Rodríguez, 2003, Sistema de control de motores a paso utilizando micropasos, Tesis de Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.

Le, N.Q. and J.W. Jeon, 2007, An open-loop stepper motor driver based on FPGA, IEEE International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2007), Seúl, Corea.

Ocotitla Hernández, A. and T. Jaramillo Torres, 2009, Tarjeta controladora de motores de pasos unipolares basada en un modelo de autómata finito determinista implementado en microcontroladores, 8o Congreso Nacional de Mecatrónica, pp. 64-69, Veracruz, México.

Patel, A., A. Denpiya, A.N. Patel, and S.H. Chetwani, 2010, Novel microstepping technique for disc rotor type stepper motor drive, IEEE Proceedings of the 9th International Power and Energy Conference (IPEC 2010), pp. 968-972, Singapur, Singapur.

Remiro, F, F. Blanco, E. García, A. Toledo, and J. Núñez, 2006, Control de motores paso a paso con PIC, Revista Saber Electrónica, Vol. 195, No. 11, pp. 5-14.

Valvano, J.W. Microstepping. Industrial Circuits Application Note, University of Texas. 2007. Se encuentra en <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/StepperMicrostep.pdf>. Fecha de consulta: 06 Agosto 2012.

Zhang, X, J. He, and C. Sheng, 2005, An approach of micro-stepping control for the step motors based on FPGA, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2005), pp. 125-130, Hong Kong, Hong Kong.

**Recibido:** 11 de mayo de 2012

**Revisado:** 20 de julio de 2013

**Rodríguez Ángeles, Eduardo:** Ingeniero en Control y Automatización (1999), con Maestría en Ciencias en Control Automático (2001), y Doctorado en Ciencias en Control Automático (2004). Actualmente trabaja en proyectos de control y automatización.

**Pérez Merlos, Juan Carlos:** Ingeniero en Electrónica en Instrumentación (1986), con Maestría en Ingeniería en Informática (1998), y es candidato a Doctor en Ingeniería Industrial–Tecnologías de Información. Actualmente trabaja en proyectos de control y automatización. Correo electrónico: [jcjc63@yahoo.com](mailto:jcjc63@yahoo.com).

**Vilchis González, Adriana:** Ingeniera en Computación, con Doctorado en Imagen, Visión y Robótica (2003). Actualmente trabaja en proyectos aplicados al área de la salud, desarrollando tecnología médica. Correo electrónico: [hvigady@hotmail.com](mailto:hvigady@hotmail.com)

