

CONTROLADOR DE MOTORES PASO A PASO MEDIANTE TÉCNICA DE MICROPASOS POR MODULACIÓN DE ANCHO DE PULSO

SERGIO BERTI* JAVIER ROITMAN** CLAUDIO VERRASTRO***

* Grupo de Inteligencia Artificial, UTN - FRBA, Argentina
sergioandresberti@yahoo.com.ar

** Grupo de Inteligencia Artificial, UTN - FRBA, Argentina
jroit@sinectis.com.ar

*** Grupo de Inteligencia Artificial, UTN - FRBA, Argentina
CNEA Dto. Instrumentación y control
cverra@cae.cnea.gov.ar

Resumen— Los motores paso a paso, se caracterizan por tener una elevada capacidad de posicionamiento. Esto hace que sean ideales en sistemas donde se requiera grandes precisiones en los movimientos. En este trabajo, se presenta una manera de realizar una técnica denominada micropasos implementada solamente con un microcontrolador y el driver de los motores mediante modulación de ancho de pulso. Se procederá también a hacer una detallada explicación de dicha técnica, prestaciones del sistema propuesto, y un análisis de las ventajas y desventajas frente a los sistemas actuales.

Palabras claves— Pasos, medios pasos, micropasos, conversor analógico digital, modulación de ancho de pulso, torque, corriente.

I. INTRODUCCIÓN

Un motor paso a paso, se puede definir como un conversor electromagnético incremental que transforma pulsos eléctricos en movimientos angulares de un eje. Este movimiento angular, se repite exactamente con cada pulso sucesivo que el circuito de control inyecta al motor [1].

Como resultado, los motores paso a paso poseen una elevada capacidad de posicionamiento. Esta característica los hace ideales para sistemas que requieran un control exacto de dirección, velocidad y posición de un movimiento [1].

El único error del tipo sistemático que tiene un motor paso a paso, es su propio error de paso que está en el orden del 5% aproximadamente. Este error no se acumula, no depende del ángulo total girado ni del número de veces que se repita la posición final [1].

Los motores paso a paso cuentan básicamente con tres secuencias de giro: excitación por bobina simple, por bobina doble y la de medios pasos.

La secuencia de excitación por bobina doble provee mayor torque que la de bobina simple, resultando ambas en un movimiento angular igual al paso del motor.

La secuencia de medios pasos, alterna las secuencias de excitación por bobina simple y por bobina doble. De esta manera, se obtiene mayor precisión en los movimientos ya que permite movimientos cada medio ángulo de paso.

En sistemas donde se necesite todavía mayor precisión, se recurre a una técnica denominada micropasos.

La técnica de micropasos, consiste en que un motor paso a paso alcance posiciones intermedias entre un paso y un medio paso. De esta manera, en un motor de $1,8^\circ$ por paso por ejemplo, realizando 8 micropasos por paso se podría obtener, movimientos cada $0,225^\circ$.

La técnica de micropasos trae aparejado otras ventajas tales como reducción de los problemas de resonancia y mejora en la velocidad de rotación. También tiene limitaciones físicas por problemas de linealidad y de la fricción estática del dispositivo mecánico.

Actualmente los circuitos típicos de micropasos consisten en una fuente de potencia de corriente continua, un circuito lógico asociado y un conversor analógico digital (CDA) que genera tensiones de referencia.

La corriente circulante por el bobinado del motor se compara con los valores de referencia del CDA, logrando mediante la lógica asociada un tren de pulsos que energizan las espiras de dicho motor.

En el sistema propuesto, la corriente necesaria en las espiras del motor, se establece mediante modulación de ancho de pulso (PWM) en forma directa por un microcontrolador.

II. DESARROLLO

A. Micropasos y secuencia de control

Un motor paso a paso de dos fases, tiene dos bobinas dispuestas en forma tal que producen dos flujos magnéticos a 90° geométricos uno respecto del otro tal como lo indica la fig. 1. El esquema de un motor real puede apreciarse en las figs. 2, 3 y 4.

Si se energiza la bobina 1, el rotor del motor llega a

una posición de equilibrio alineándose con el campo magnético generado por dicha bobina.

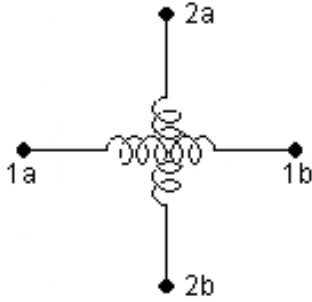


Figura 1. Esquema representativo de la disposición de las bobinas de un motor bipolar de dos fases.

Referenciando los arrollamientos a un par de ejes XY y tomando a esta posición de equilibrio como inicial, se dice que el motor se encuentra en posición de equilibrio a 0° (Fig. 2).

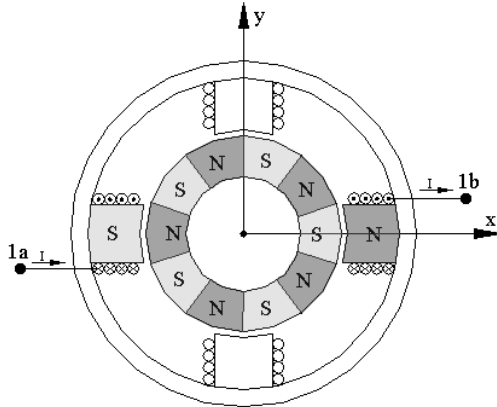


Figura 2. Motor paso a paso de dos fases excitado por una bobina en posición de equilibrio a 0° .

Excitando la bobina 2, el campo resultante gira 90° geométricos, con lo cual, el rotor realiza un desplazamiento angular igual al paso "P" del motor (Fig. 3).

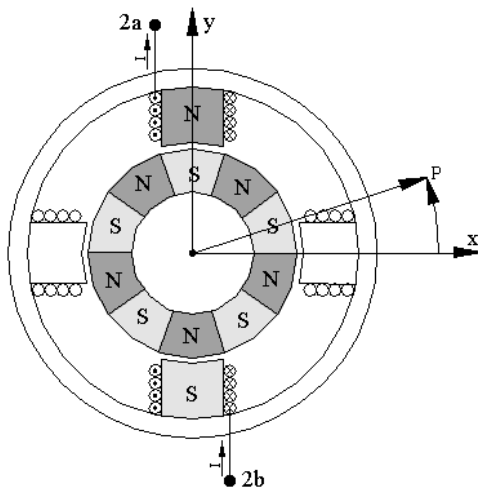


Fig. 3. Motor paso a paso de dos fases rotado a un paso de la posición de equilibrio a 0° .

El flujo magnético entre el rotor y el estator originan fuerzas (cupla de retención) que tienden a mantener al rotor en posiciones de equilibrio cada paso del motor.

Excitando las dos bobinas en forma simultánea, el rotor intentará alinearse con los dos campos magnéticos generados y, debido a la naturaleza vectorial de los mismos, encontrará una posición de equilibrio en dirección al vector resultante de los dos campos (Fig. 4).

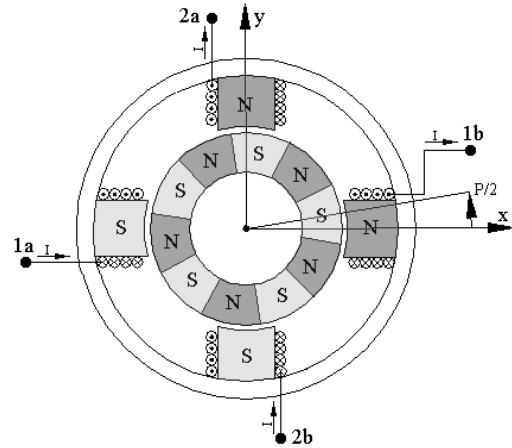


Fig. 4. Motor paso a paso excitado por dos bobinas en forma simultánea.

De las posiciones de los campos magnéticos resultantes y las cuplas de retención, se puede confeccionar el siguiente gráfico vectorial (Fig. 5).

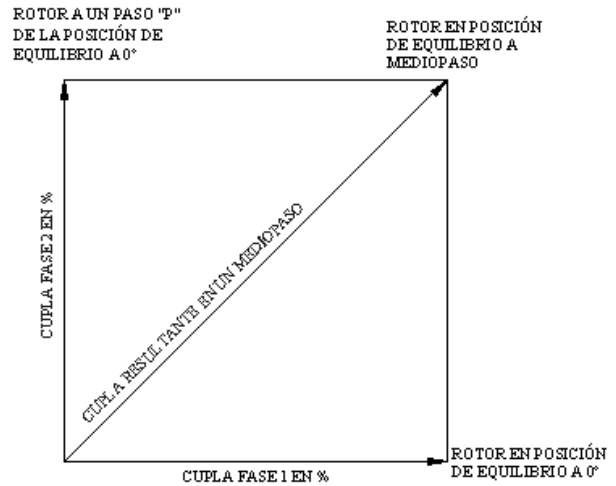


Fig. 5. Diagrama fasorial correspondiente a cupla y posiciones del campo magnético resultante en un motor paso a paso de dos fases.

Observando la fig. 5, queda en evidencia que el problema cupla-posición de equilibrio en un motor ideal es un problema geométrico. Por lo tanto, la cupla resultante de retención (Torque resultante) queda definida por la eq. (1), e indica que si se energiza una sola bobina, la cupla resultante es la que produce la bobina excitada (la otra es cero). Si ambas fases producen la misma cupla en forma individual, el torque

resultante es un 41% mas que el producido por una sola bobina. Cuando el campo magnético rota 90° geométricos, el rotor realiza un desplazamiento angular igual al paso del motor, por lo que la posición del eje queda determinado por la eq.2.

$$T_r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{P}{\pi/2} \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2)$$

En donde:

X –Torque por bobina en equilibrio a 0°.

Y –Torque por bobina en equilibrio a un ángulo de paso de la posición de equilibrio a 0°.

T_r – torque resultante de retención.

θ - posición de equilibrio.

P – ángulo de paso.

La eq. (2) determina la posición del rotor de acuerdo a las cuplas provocadas por la excitación de las bobinas. Si la relación de cuplas Y/X es cero, el eje se encuentra en la posición de referencia (Fig. 2), si es igual a uno se encuentra en un medio paso (Fig. 4) y si la cupla provista por el flujo magnético en dirección “x” es cero (Fig. 3) el rotor realiza un desplazamiento angular igual al paso del motor.

Teniendo en cuenta que, si los circuitos magnéticos no están saturados, la cupla producida tiene una relación lineal con la cantidad de corriente circulante por las espiras del bobinado. Por lo tanto, variando la cantidad de corriente circulante por las espiras, se puede variar en forma lineal las cuplas provocadas, variando la cupla resultante (Eq. 1) de manera de que el efecto sea igual a la producida por una sola bobina.

Si no hay saturación en ninguno de los circuitos magnéticos, la relación entre cuplas, es numéricamente igual a la relación entre corrientes circulantes por las bobinas. En consecuencia, si se modifican las cantidades de corriente en forma gradual pero en diferentes proporciones en cada bobina, también varían de igual manera las cuplas respectivas, cambiando la relación (Y/X) existente entre ellas en la eq. (2), con lo que se pueden obtener en principio, infinitas posiciones intermedias entre pasos .

Entonces, en motores ideales de reluctancia variable o de imán permanente, combinando las eqs. (1) y (2), de manera tal de excitar en forma gradual y secuencial los bobinados limitando la corriente circulante por las espiras, no habiendo saturación magnética, se obtienen sucesivas posiciones intermedias entre pasos con cupla de retención constante e igual a la de una bobina, es decir, se obtienen micropasos a cupla constante.

La tabla 1 ilustra las cantidades de corrientes en % para las distintas posiciones de ocho micropasos con cupla resultante constante e igual a la provocada por una bobina.

	Corriente Fase 1	Corriente Fase 2	Posición
0	100%	0%	Paso
1	98,1%	19,5%	1/8 de Paso
2	92,4%	38,2%	1/4 de Paso
3	83,1%	55,5%	3/8 de Paso
4	70,7%	70,7%	Medio Paso
5	55,5%	83,1%	5/8 de Paso
6	38,2%	92,4%	3/4 de Paso
7	19,5%	98,1%	7/8 de Paso
8	0%	100%	Paso

Tabla 1. Porcentaje de corriente en las espiras de un motor correspondientes a ocho micropasos con cupla resultante constante.

La fig. 6 es el diagrama fasorial correspondiente a la tabla 1, en la cual, queda de manifiesto la cupla resultante constante e igual a la producida por una sola bobina.

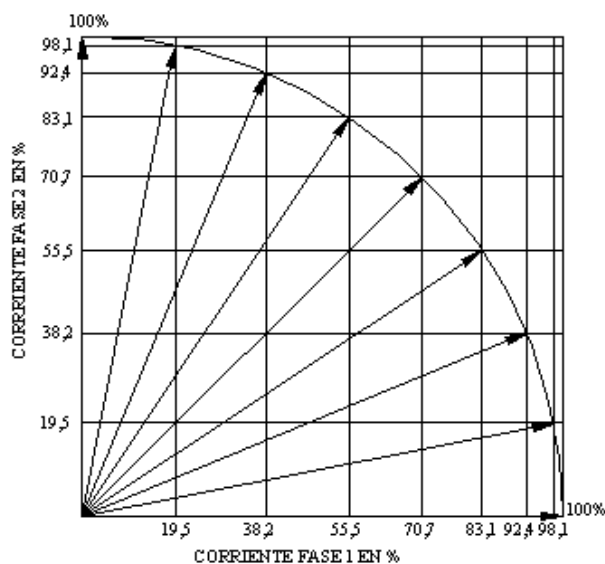


Figura 6. Diagrama fasorial correspondiente a ocho micropasos con cupla resultante constante e igual a la provocada por una bobina.

B. Micropasos y PWM

Para realizar micropasos, los valores de corriente que circulan por las bobinas del motor deben ser controlados en forma secuencial.

Un método para limitar la corriente es mediante modulación de ancho de pulso.

En posiciones intermedias entre pasos, las fases del motor se alimentan mediante un tren periódico de pulsos rectangulares, variando el ciclo de actividad de los pulsos, se varía el valor medio de la tensión resultante en el tiempo, con lo que se modifica la cantidad de corriente circulante por las espiras de los bobinados.

En la fig. 7 Se ilustra un ejemplo de un ciclo de

actividad de 3/4 del período T, con lo que se obtiene un valor medio resultante equivalente a las 3/4 partes de la tensión aplicada.

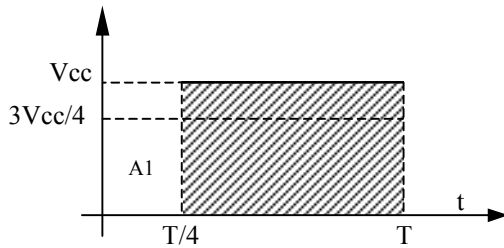


Figura 7. Igualdad de áreas y valor medio de tensión en un pulso rectangular.

En forma analítica, el valor medio de tensión se puede calcular planteando la igualdad de áreas A1 y A2 durante el período T del pulso rectangular.

$$\left(T - \frac{T}{4}\right)(V_{cc} - V) = \frac{T}{4} \times V$$

$$V = 3 \times \frac{V_{cc}}{4}$$

En donde:

V – Valor medio de tensión resultante.
Vcc – Tensión pico del pulso.

Planteando el problema en forma mas general, se llega a la siguiente expresión

$$V = V_{cc} \left(1 - \frac{n}{m}\right) \quad (3)$$

En donde:

n/m - Porción del período T.
V - Valor medio de tensión resultante.
Vcc - Tensión pico del pulso.

Se observa en eq (3), que, fijando un valor m, el valor medio de tensión resultante es proporcional a los valores de n. Para un número “m” determinado, se puede variar li- nealmente el valor medio de tensión dando distintos valores a n.

C. Micropasos y circuitos asociados

Un esquema típico de micropasos se observa en la fig. 8. La corriente que circula por el bobinado del motor se compara con un valor de referencia generado por un conversor digital analógico (CDA), mediante la lógica asociada se genera un tren de pulsos que energizan las espiras según el estado del CDA y de la habilitación.

Con a y b se selecciona la fase del motor, Vo a Vn establecen la tensión de referencia del CDA, el comparador y el monoestable conforman el tren de

pulsos que se traducen en cantidad de corriente circulante por las espiras del bobinado.

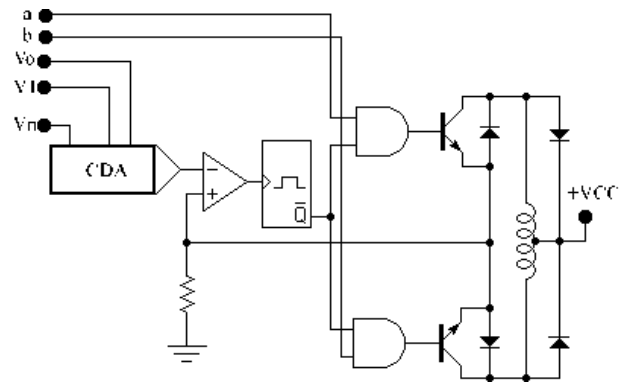


Figura 8. Circuito típico de micropasos.

En el sistema propuesto, los niveles de corriente necesarios, también se realizan por modulación de ancho de pulso (PWM). La diferencia fundamental es que el PWM es generado por un microcontrolador, no siendo necesario un CDA, un comparador ni un monoestable.

En la fig. 9 se observa el esquema del sistema propuesto, el microcontrolador junto al driver propiamente dicho de los motores (además de la electrónica adicional) conforman los únicos elementos del sistema.

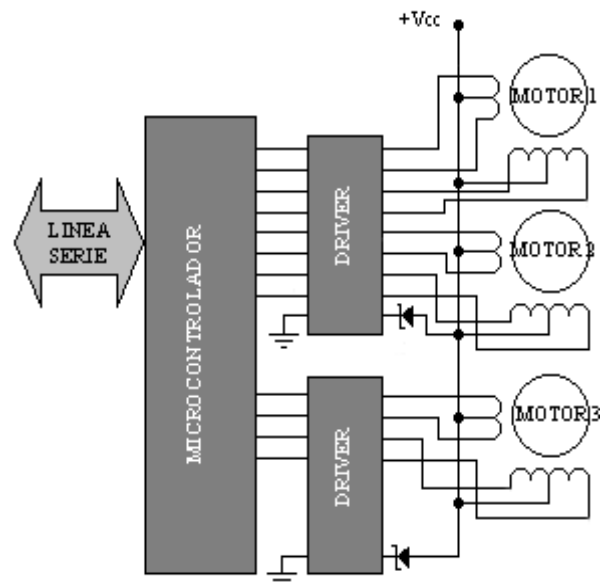


Figura 9. Esquema del sistema de micropasos propuesto.

D. Prototipo construido

El prototipo se construyó con un AT89C51 y dos ULN2803A para manejar tres motores unipolares, pudiendo realizar hasta ocho micropasos.

La comunicación del microcontrolador con el exterior es via serie, por donde arriban la cantidad de micropasos

a realizar y sentido de giro de los motores de acuerdo al protocolo establecido. Cuenta además con entradas para la señal de los index, fines de carreras programables por software, informe de status y control e informe de errores.

La modulación de ancho de pulso se lleva a cabo utilizando la eq. (3), en donde m, son las cuentas del temporizador del microcontrolador.

Para un período aproximado de 1 KHz, se tiene que $m=948$

$$V = V_{cc} \left(1 - \frac{n}{948} \right) \quad (4)$$

Dando valores adecuados a n , se obtienen los valores intermedios entre 0V y V_{cc} que generan las corrientes necesarias para una secuencia de micropasos.

n	Tensión [V]
0	12
5	11,9
10	11,8
45	11,43
84	10,9
154	10
242	8,9
474	6
948	0

Tabla 2. Tensiones (valores medios) en un motor de 12 Voltios para valores de n con $m=948$.

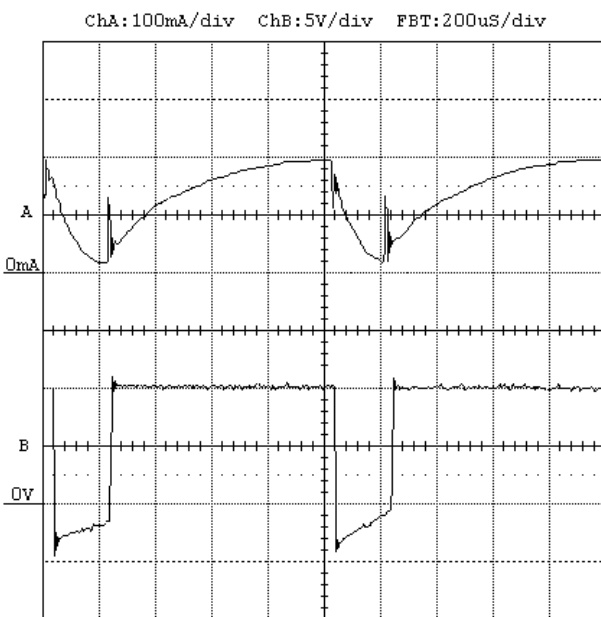


Figura 10. Formas de onda de corriente y tensión en una bobina de un motor paso a paso en un micropaso.

La tabla 2, ilustra las tensiones obtenidas en un motor unipolar de 12 Voltios para valores de n necesarios en una secuencia de ocho micropasos.

Las formas de onda, se generan con una rutina de atención de la interrupción que produce uno de los temporizadores del microcontrolador.

Las figs. 10 y 11 muestran las formas de onda de tensión y corriente en una bobina de un motor paso a paso en un micropaso.

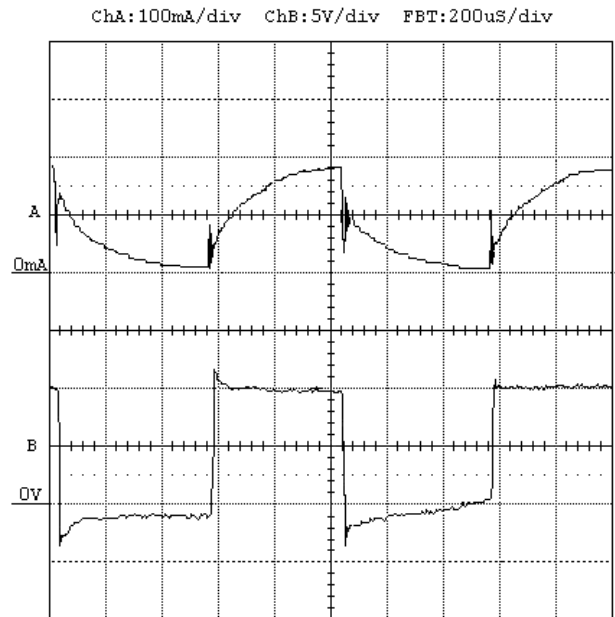


Figura 11. Formas de onda de corriente y tensión en una bobina de un motor paso a paso en un micropaso.

La tabla 3 muestra los valores de corriente en las bobinas y los errores cometidos en cuanto a posición y torque resultante en un motor paso a paso real de dos fases de acuerdo a la tabla2.

Grados	Fase A [mA]	Fase B [mA]	$\epsilon\%$ Posición	$\epsilon\%$ Torque resultante
0	0	230	0%	0%
0,225	44,8	225,6	0,16%	0%
0,45	87,8	212,5	0,22%	0,03%
0,675	127,6	191,1	0,1%	0,09%
0,9	162,6	162,6	0%	0,02%
1,125	191,1	127,6	0%	0,09%
1,35	212,5	87,8	0,07%	0,03%
1,575	225,6	44,8	0%	0%
1,8	230	0	0%	0%

Tabla 3. Posiciones y cuplas obtenidas.

La tabla 3, permite la confección de los gráficos de las figs. 12 y 13, en donde se ilustran torque resultante ideal-torque resultante real y posición ideal-posición real.

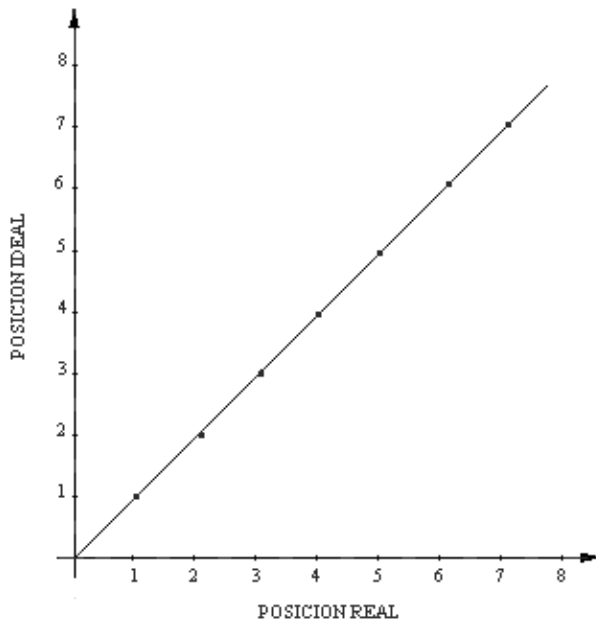


Figura 12. Posiciones reales - posiciones ideales.

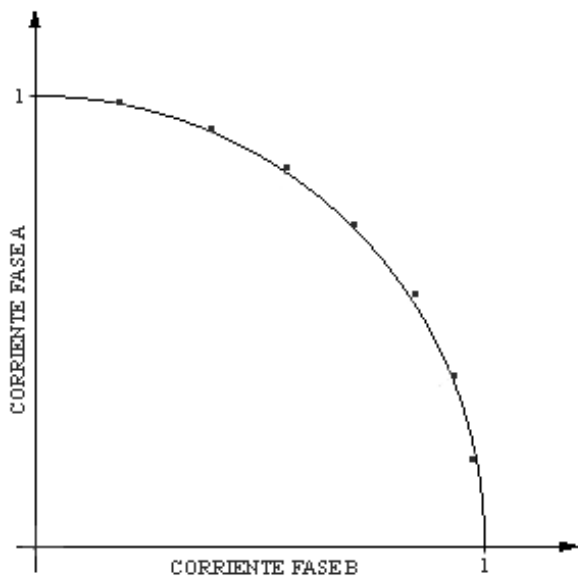


Figura 13. Torque resultante ideal - torque resultante real

Estos gráficos contrastan el comportamiento de un motor ideal con el comportamiento de un motor paso a paso real, en donde al error del sistema se suman los errores cometidos por la fricción estática del dispositivo mecánico.

III. CONCLUSIONES

El prototipo construido tiene la ventaja de ser económico y sencillo, ya que básicamente solo consta de un microcontrolador AT89C51 y los drivers para los motores ULN2803A.

Un factor que determina la resolución del sistema, es la resolución del timer, siempre mejor que la de un convertidor digital analógico.

El error cometido en la generación de los distintos valores de tensiones mediante este sistema, está en el orden del 0,1%.

Otro factor que influye en la precisión del sistema es el valor de "m" en la eq. 3, que se corresponde al número de bits de un CDA. En el sistema propuesto, "m" puede ajustarse a las requerimientos propios de cada necesidad, puede aumentarse tanto como el microcontrolador usado lo permita. Esta característica, permite un sistema flexible y ajustable, aplicable a una diversidad de aplicaciones.

Algo para destacar son los ruidos que emite, produce ruidos eléctricos propio del switching que contaminan la línea de alimentación, y ruido mecánico debido a la baja frecuencia del PWM.

El ruido eléctrico puede eliminarse mediante filtros de línea y el ruido mecánico se puede solucionar aumentando la frecuencia de los trenes de pulsos de PWM, aumentando la velocidad de trabajo del micro o utilizando un microcontrolador más veloz.

REFERENCIAS

- 1- Meier C.F, Rios J. A., Pereyra H., "Manual Czerweny, Motores Paso a Paso" Parte III, Galvez Pcia de Santa Fe ,1980.
- 2- William H. Yeadon y Alan W, Yeadon, "Handbook of Small Electric Motors", secciones 5.2.10, 10.8, 10.9 y 10.10, McGraw-Hill (c2001).