

CONTROL ELECTRÓNICO DE UN ALTERNADOR DE CARGA AUTOMÁTICO

Luis M. Peña (lpena@cenam.mx), Luz M. Centeno (lcenteno@cenam.mx),
Luis O. Becerra (lbecerra@cenam.mx)
Centro Nacional de Metrología (CENAM)
Km 4,5 Carretera a Los Cués, Municipio del Marqués, Querétaro, México

Resumen: En el Laboratorio del Patrón Nacional de Densidad del CENAM se está llevando a cabo la automatización de las mediciones utilizando un sistema para pesada en aire y en agua. El presente trabajo expone el diseño y la solución a los problemas encontrados en el control electrónico de los motores (a pasos) encargados del movimiento vertical y angular de un alternador de carga para las mediciones de pesada en el aire.

INTRODUCCIÓN

En la División de Masa y Densidad del CENAM se está llevando a cabo la implementación de dos esferas de zerodur como Patrón Nacional de Densidad de México. La transferencia de la exactitud de las esferas hacia sólidos y líquidos se realiza mediante pesada hidrostática, realizando diferentes mediciones en aire y agua, y comparar los diferentes valores de empuje en el cual está inmersa la esfera utilizando un instrumento para pesar.

El objetivo de este trabajo en el laboratorio del Patrón Nacional de Densidad es automatizar las mediciones de pesada en el aire utilizando un sistema electromecánico y mejorar la desviación estándar de las mediciones de masa en el aire y con eso, mejorar la incertidumbre en la determinación de la densidad.

DESARROLLO

Actualmente, las pesadas en el aire para determinar la masa de las esferas patrón se realizan manualmente, por lo tanto, la desviación estándar de las mediciones es grande debido a factores humanos tales como los periodos de tiempo diferentes entre pesada y pesada, la vibración y fuerza de colocación de los patrones en el instrumento para pesar (balanza).

Con el alternador de carga automático, se pretende disminuir el factor humano en las mediciones de pesada en el aire obteniendo periodos de tiempo iguales entre pesada y pesada, reducir la vibración y mantener una fuerza de colocación constante de los patrones en el instrumento para pesar.

El alternador de carga es un sistema electromecánico el cual es utilizado para colocar e intercambiar de manera automática las esferas patrón sobre el plato receptor de un instrumento para pesar; las lecturas del instrumento se registran para su posterior análisis.

Características Mecánicas del Alternador:

El alternador de carga consta de un disco giratorio sobre el cual serán colocadas las esferas. El material del cual está hecho el alternador es de acero inoxidable T-304; los receptáculos donde están montados los patrones son de teflón para evitar que sean rayados o maltratados.

En cuanto a su movimiento, el alternador tendrá dos grados de libertad: uno para movimiento vertical y otro para movimiento angular o giratorio. El disco del alternador está montado sobre unos baleros de carga radial y en su centro tiene un tornillo de bolas sin fin de alta precisión.

Los movimientos del disco serán ejecutados por dos motores a pasos tipo bipolar; uno de ellos está acoplado al tornillo de bolas, el cual se encarga del movimiento vertical del disco del alternador; el otro motor posee una polea dentada en su flecha, que a su vez, utilizando una banda dentada se acopla a otra polea ubicada en el disco del alternador para ejecutar el movimiento giratorio del disco (ver Figura 1).

Características Eléctricas del Alternador:

Los movimientos del alternador serán ejecutados, como se dijo anteriormente, por dos motores a pasos bipolares. Estos motores ofrecen un excelente torque a bajas velocidades, son de bajo costo y facilitan la tarea de control de su posición.

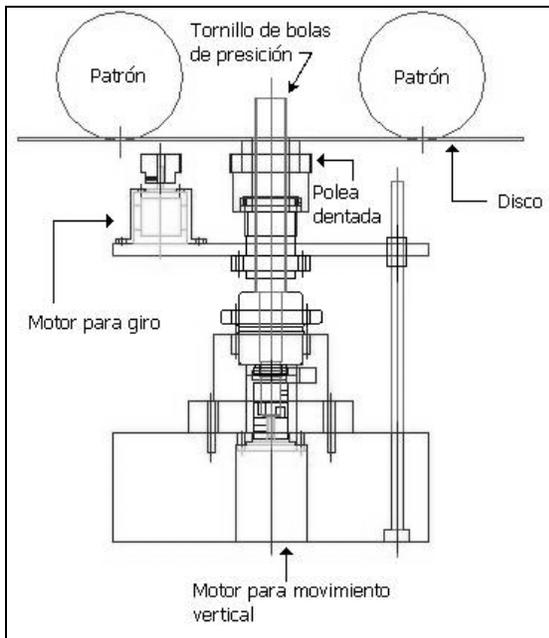


Figura 1. Alternador de carga.

El motor encargado del movimiento vertical requiere de una potencia de entrada de 8,2 W ofrece un torque de 0,883 N·m. Por su parte, el motor del movimiento angular del disco requiere de una potencia de entrada de 4,8 W y proporciona un torque de 0,255 N·m [1]. Ambos motores tienen una resolución angular de 1,8° por paso en modo “paso completo” (0,9° por paso en modo “medio paso”). Cada motor tiene cuatro bobinas en su interior, las cuales pueden ser conectadas en un arreglo serie o paralelo.

El alternador cuenta también con sensores que son utilizados para definir la posición exacta del disco del alternador, tanto angular como vertical.

Desarrollo del control electrónico:

El esquema de control utilizado es el que se muestra en la siguiente figura:

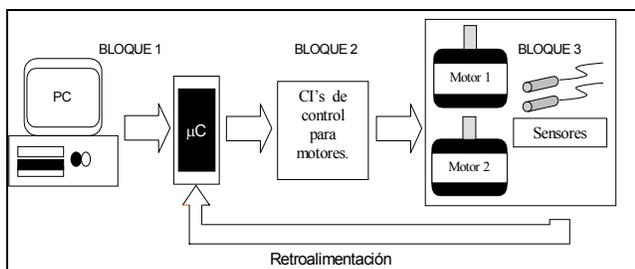


Figura 2. Diagrama de control de los motores del alternador de carga.

Los motores a pasos (BLOQUE 3, Figura 2) están constituidos por dos partes: a) Una fija llamada estator, construida a base de cavidades en las que van depositadas las bobinas y b) por un rotor de imán permanente con el mismo número de pares de polos que en el estator. El movimiento del rotor se consigue excitando las bobinas del estator en una secuencia conveniente, dando como resultado un campo magnético giratorio. Para conseguir la adecuada secuencia de excitación de las bobinas del estator, se debe implementar un circuito electrónico que sea capaz de generar el campo magnético giratorio [2].

Comercialmente existen circuitos integrados especializados para el manejo de motores a pasos, más aún, existen módulos llamados “drivers” que facilitan la tarea de control, sin embargo, su costo es sumamente elevado.

En el diagrama de control de la figura 2 se representan en el BLOQUE 2 los circuitos integrados dedicados a mover los motores a pasos, cuyo número de identificación son el L297 y L298.

El L297 integra toda la circuitería de control requerida para manipular motores a pasos. Dado que se trata de un circuito integrado digital TTL¹, requiere de un actuador de potencia (en este caso el c.i.² L298), logrando así una interface completa microcontrolador-motor a pasos.

El L297 recibe señales de control, generalmente provenientes de un microcontrolador, y suministra todas las señales necesarias para la etapa de potencia. Es por eso que al L297 se le conoce como circuito *traductor*. Además, incluye dos circuitos PWM (Pulse Width Modulation) para regular la corriente a través de las bobinas del motor [3].

El L298 es un c.i. diseñado para aceptar señales con niveles lógicos TTL y manejar cargas inductivas como relevadores, solenoides, motores de c.d.³ y motores a pasos. Puede manejar tensiones eléctricas de 0 hasta 46V de c.d. y una corriente máxima de salida de 4A. Ofrece alta inmunidad al ruido y cuenta con protección contra sobre calentamiento [4]. Cuenta también con otra terminal adicional para una fuente de alimentación digital TTL. Como característica extra, el L298 tienen dos

¹ TTL (Transistor-Transistor Logic). Se refiere a señales digitales donde un “0 lógico” equivale a 0V y un “1 lógico” equivale a 5V.

² c.i. significa “circuito integrado”.

³ c.d. significa “corriente directa”

terminales de habilitación o *enable*, y dos terminales para conectar una resistencia denominada *resistencia externa de sensado*,

En el BLOQUE 1 se encuentra el microcontrolador el cual contiene el programa que se encarga de generar los señales de control que recibe el c.i. L297 para mover los motores; a su vez, este programa también puede recibir señales provenientes de una computadora personal (PC) para ejecutar alguna rutina de movimiento especificada.

El alternador de carga cuenta con sensores de proximidad inductivos, los cuales se utilizan para determinar la posición exacta del disco del alternador, tanto vertical como angular. Cuando los sensores son activados, la señal que proviene de ellos se retroalimenta al microcontrolador y de acuerdo al algoritmo del programa de éste último los motores ejecutan alguna acción (de movimiento o de paro).

La Figura 3 ilustra una típica interface completa microprocesador-motor bipolar a pasos utilizando los c.i.'s L297 y L298. Se hace notar en dicha figura un arreglo de diodos conectados entre las bobinas del motor a pasos y el c.i. L298. Los diodos sirven para ofrecer un camino de descarga de la energía almacenada en las bobinas del motor al momento de cambiar su polaridad de excitación. Estos diodos se encuentran encapsulados en un c.i. cuyo número de identificación es el L6210.

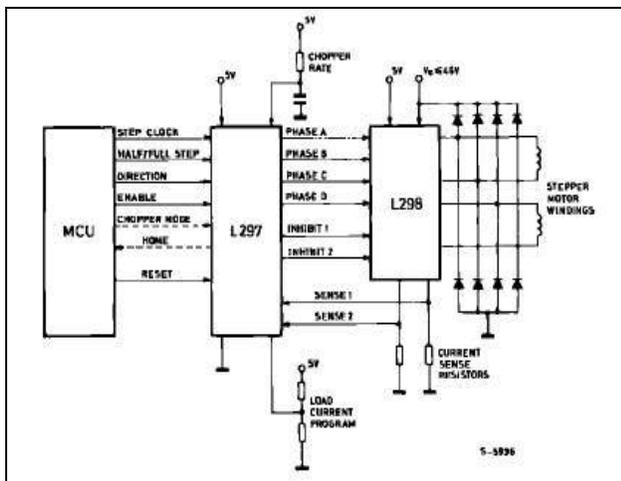


Figura 3. Configuración típica del uso de los c.i.'s L297 y L298, para formar una interface completa microcontrolador-motor a pasos.

Problemas encontrados durante la realización de pruebas de movimiento del alternador de carga:

Durante la realización de pruebas de movimiento del alternador se detectaron varios problemas los cuales se enumeran a continuación:

- i. **Inercia mecánica.** El disco del alternador de carga, junto con el peso de las esferas patrón tienen en conjunto un peso aproximado de 6kg. El motor encargado del movimiento angular realizaba en el arranque y en el paro movimientos indeseables (movimientos de vaivén y vibratorios).
- ii. **Insuficiencia de torque.** El motor del movimiento vertical carecía de la suficiente fuerza para realizar el desplazamiento vertical del disco del alternador.
- iii. **Sobre calentamiento de los motores.** Uno de los problemas más comunes en los motores a pasos en general es el calentamiento que presentan debido a su principio de funcionamiento. Para mejorar el torque de los motores a pasos es necesario incrementar la corriente a través del embobinado del estator, pero esto genera pérdidas de energía en forma de calor por efecto Joule.

Solución a los problemas de movimiento del alternador de carga:

Solución i. Para contrarrestar el movimiento no deseado en el motor de giro del alternador se sugirieron las siguientes alternativas de solución:

- a) Colocar un reductor de velocidad en la flecha del motor para aumentar el torque del motor y disminuir la inercia de la carga.
- b) Aumentar la intensidad de corriente que circula en las bobinas del motor y lograr un aumento de torque en el motor, contrarrestando el efecto de la inercia.
- c) Programar en el microcontrolador una rampa de velocidad, tanto para el arranque como para el paro del movimiento del motor.

El problema se solucionó incrementando la corriente en el motor pero a su vez, se programaron las rampas de velocidad de arranque y de paro. Con esto se consiguió hacer un movimiento suave en el desplazamiento angular del disco del alternador; la colocación de un reductor de velocidad implicaba cambios mayores en el diseño mecánico.

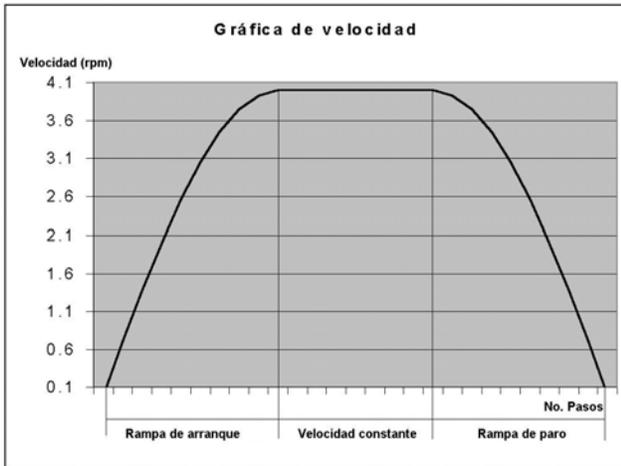


Figura 4. Ejemplo de gráfica de velocidad contra el número de pasos del motor para movimiento angular del alternador.

Solución ii. Para obtener el torque necesario en el motor del desplazamiento vertical del alternador, se modificó el circuito de potencia incrementando la corriente que circula a través de las bobinas del motor. Esto ofrece una desventaja, el calentamiento excesivo del motor, sin embargo, éste se encuentra alojado dentro de una caja de acero inoxidable que por conducción favorece la disipación del calor del motor.

Solución iii. Una de las desventajas que presentan los motores a pasos es el excesivo calentamiento que generan en su interior.

Los c.i.'s L297 y L298 incluyen una técnica de regulación de corriente con un circuito comparador de tensión eléctrica y un modulador de ancho de pulso.

La corriente que circula por las bobinas del motor pasa también a través de una *resistencia de sentido* (generalmente de un valor no mayor a los 10Ω), que va entre una de las terminales del c.i. L298 y tierra. La caída de tensión en esta resistencia se dirige hacia una de las terminales del c.i. L297, donde se encuentra un comparador de tensión eléctrica.

El comparador de tensión hace una diferencia entre la tensión de la *resistencia de sentido* y una *tensión de referencia externa* (definido según la cantidad de corriente que se desee). Cuando la tensión en la resistencia de sentido es mayor a la tensión de referencia, quiere decir que la corriente que circula por las bobinas del motor es mayor a la deseada,

entonces el c.i. L297 manda una señal al c.i. L298 para que se dejen de energizar la bobinas del motor; una vez que la corriente en las bobinas del motor disminuye, se vuelven a energizar las bobinas para que alcance el valor de corriente deseado.

A esta técnica se le conoce como regulación de corriente con modulación de ancho de pulso (PWM) (Figuras 5 y 6).

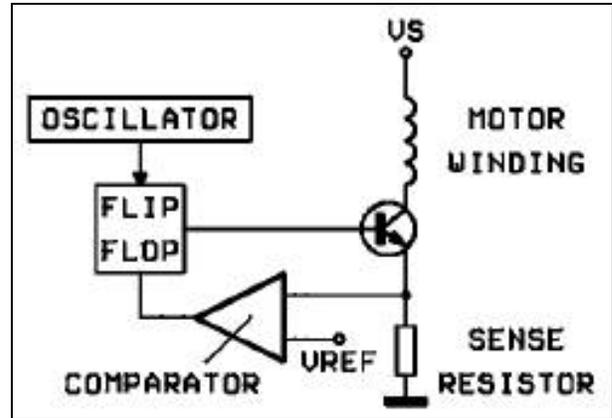


Figura 5. Circuito para la regulación de corriente por la técnica PWM (Modulación de ancho de pulso).

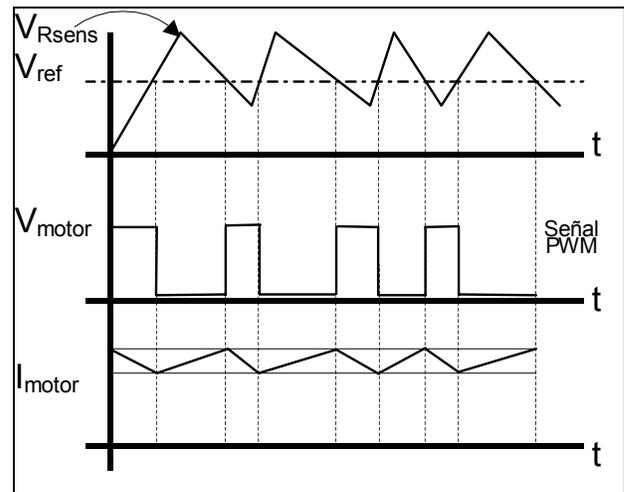


Figura 6. Señales que intervienen en la regulación de corriente del motor a pasos por PWM.

RESULTADOS

Después de realizar las pruebas de movimiento del alternador de carga haciendo las modificaciones mencionadas propuestas en las soluciones i, ii e iii

se consiguió un desempeño óptimo de los motores, reduciendo su calentamiento excesivo y obteniendo movimientos suaves en el alternador (esto es, sin vibración excesiva y sin movimientos de vaivén).

La circuitería de potencia fue modificada para aumentar la corriente a través del embobinado de los motores, sin embargo, fue necesario además colocar un arreglo de capacitores como filtros en el circuito de control (microcontrolador y c.i. L297) para disminuir el ruido electromagnético generado por las bobinas de los motores.

CONCLUSIONES

Una adecuada combinación de las soluciones presentadas en este trabajo, para mejorar el desempeño de los motores del alternador, permitió obtener los resultados esperados.

Un aumento en la corriente de las bobinas de los motores trae como beneficio un aumento en su torque de salida, sin embargo también se genera un calentamiento excesivo en el mismo, además de la inducción de ruido electromagnético que afecta la circuitería de control. Utilizando las rampas de velocidad de arranque y de paro, así como el arreglo de capacitores, el calentamiento y el ruido electromagnético fueron reducidos considerablemente.

No hubo necesidad de modificar el diseño mecánico del alternador –como se proponía en el inciso a) de la **Solución i**.- ya que esto genera costos en cuanto a tiempo y dinero.

Es importante destacar que tanto el diseño mecánico como el electrónico fueron desarrollados por el personal de la División de Masa y Densidad del CENAM.

Este proyecto es parte de la automatización del Laboratorio del Patrón Nacional de Densidad, con este sistema se pretende obtener mayor calidad en las mediciones de masa en el aire reduciendo los factores humanos que incrementan la desviación estándar en las mismas [5]. Los valores de desviación estándar obtenidos con las pesadas en el aire realizadas manualmente están alrededor de los 500 μ g. Con el alternador de carga automático se pretende eliminar por completo el factor de influencia humano y obtener desviaciones estándar de 30 ó 40 μ g en las mediciones, aunado a éstas, las mediciones de pesada hidrostática con el sistema automático ilustrado en la figura 7, se

espera tener una incertidumbre en las mediciones de densidad del orden del $\pm 1 \times 10^{-6}$ o mejor.

El alternador de carga automático será acoplado al sistema de automático de pesada hidrostática, el cual también fue desarrollado en la División de Masa y Densidad del CENAM.



Figura 7. Sistema automático para pesada hidrostática del Laboratorio del Patrón Nacional de Densidad.

REFERENCIAS

- [1] Servo Systems Co., 1999-2000 Catalog, Stepper Motors-Applied Motion Products, pp. 23,26.
- [2] Motores paso a paso, página de internet <<http://www.netcom.es/celes/page3.html>>, 31 de enero de 2001.
- [3] SGS-Thompson Microelectronics, The L297 Stepper Motor Controller, pp. 1-18.
- [4] SGS-Thompson Microelectronics, L298 Dual Full-Bridge Driver, pp. 1-13.
- [5] Mario Mosca, Giancarlo Birello, Alessandro Cappa, Savino Pettorusso, Anna Peuto, Calibration of a 1 kg automatic weighing system for density measurements, pp. 1-3.