

Automatización de un dinamómetro de corrientes parásitas

Erick Ramírez, Guillermo Becerra, Alfonso Pantoja-Vázquez
Luis Alvarez-Icaza

*Instituto de Ingeniería-Universidad Nacional Autónoma de México,
Coyoacán D. F. 04510, México (e-mail: erickramirez105@gmail.com,
guillermobec@gmail.com, apantojav@iingen.unam.mx,
alvar@pumas.iingen.unam.mx).*

Resumen:

Se describe el proceso de diseño para automatizar el funcionamiento de un dinamómetro de corrientes parásitas que forma parte de un banco de pruebas para trenes de propulsión híbridos. El dinamómetro automatizado puede recibir y seguir consignas de par y velocidad que forman parte de un ciclo estándar de manejo.

Palabras clave: Dinamómetro, microcontrolador, acondicionamiento de señales, puente de Wheastone.

1. INTRODUCCIÓN

El dinamómetro es un instrumento de medición generalmente empleado para determinar el par mecánico y velocidad, o potencia de cualquier fuerza motriz rotatoria, tal como un motor eléctrico o de combustión interna (Ahmadi et al., 2013). En el mercado existe una gran variedad de dinamómetros para diferentes propósitos. Todos ellos se pueden clasificar generalmente en tres divisiones de acuerdo a Sirohi and Krishna (2004), las cuales son:

- Dinamómetros de absorción: absorben la energía mecánica de acuerdo al par medido y por lo tanto son particularmente útiles para medir potencia o par desarrollado por fuentes de potencia tales como los motores.
- Dinamómetros activos: además de absorber potencia, también pueden proveer energía para operar los dispositivos o someterlos a pruebas. Son, por lo tanto, útiles para estudiar las características de rendimiento de dispositivos tales como bombas y compresores, además, de motores.
- Dinamómetros de transmisión: son sistemas pasivos y son instalados en una localización apropiada dentro de una máquina o entre máquinas para medir par en esa localización particular.

De los tres tipos de dinamómetros mencionados anteriormente, los primeros dos se pueden agrupar en dinamómetros mecánicos y eléctricos. Los dinamómetros mecánicos son del tipo absorción mientras que los eléctricos pueden ser de ambos tipos. Así mismo, los dinamómetros eléctricos pueden ser agrupados en las siguientes clases:

- Dinamómetros de corriente directa o generadores.
- Dinamómetros de corrientes parásitas o inductores.

El dinamómetro que se automatizó en este trabajo fue uno de absorción de corrientes parásitas (Winther, 1947) que

se muestra en la Fig. 1, por lo tanto, sólo se abordará la información de éste.



Figura 1. Dinamómetro Dynamatic 8060.

El dinamómetro de corrientes parásitas (Duff, 1947) consiste de uno o más discos de metal, que giran en un campo magnético. El campo magnético es producido al pasar corriente a través de las bobinas que están unidas a la carcasa del dinamómetro. La carcasa es montada en los rodamientos.

La máquina bajo prueba hace girar el disco y a medida que éste gira en el campo magnético se generan corrientes parásitas y la reacción con el campo magnético produce un par que tiende a girar la carcasa completa del dinamómetro sobre uno de los rodamientos. En la Fig. 2 se muestra un esquema de un dinamómetro de corrientes parásitas Chalmers and Dukes (1980); Davies and Wright (1981).

Este dinamómetro presenta una curva típica de velocidad-par similar a la mostrada en la Fig. 3. Es de particular interés, la región con característica de par positivo, es decir, donde el par aumenta con un aumento de velocidad. Su amplia oferta de par, sustancialmente constante,

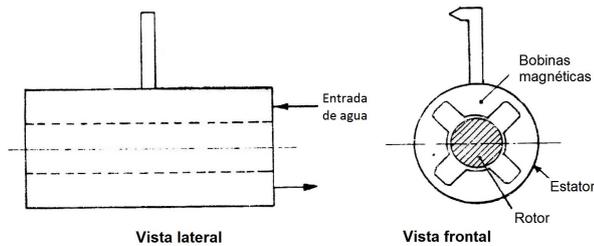


Figura 2. Dinamómetro de corrientes parásitas.

permite su uso efectivo en un amplio rango de programas de prueba.

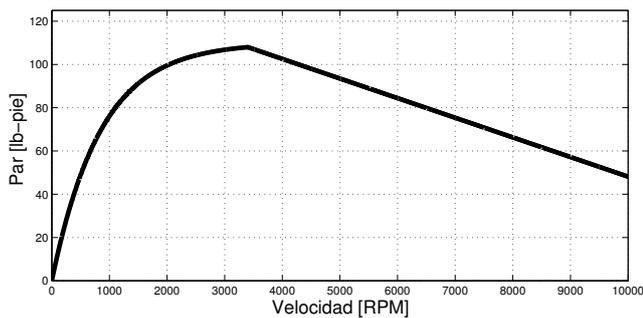


Figura 3. Curva de máximo par versus velocidad del dinamómetro Dynamatic 8060.

Los objetivos principales de este trabajo son los siguientes:

- Diseñar e implantar un sistema digital de control alternativo al sistema analógico original del dinamómetro Dynamatic 8060.
- Reproducir cargas dinámicas presentes en un ciclo de trabajo.

Parte de la motivación de este trabajo fue reemplazar el control analógico original de par y velocidad, debido a que los controladores originales ya no funcionan de manera adecuada y, además, sólo siguen referencias constantes fijadas de manera manual, lo cual los limita para seguir ciclos de trabajo variables.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera:

La sección 2 da una descripción del sistema original. En la sección 3 se describe el diseño del sistema electrónico, la captura de las señales provenientes del dinamómetro y el acondicionamiento de estas señales para su procesamiento. En la sección 4 se presenta una breve descripción del tipo de microcontrolador usado para procesar las señales de par y velocidad provenientes del dinamómetro y el esquema del programa realizado para llevar a cabo el control. La sección 5 muestra las diferentes pruebas realizadas al implantar el control de par y velocidad diseñados en este trabajo. Finalmente la sección 6 muestra las conclusiones y el trabajo futuro.

2. SISTEMA ORIGINAL

El dinamómetro de corrientes parásitas Dynamatic 8060, que se aborda en el presente trabajo, solo permite frenar, por lo que si el motor bajo prueba está por debajo del límite o referencia establecida, se pretende que el dinamómetro

libere, (es decir, ponga una menor carga) al motor para alcanzar el valor deseado, además, trabaja en dos modos o cuadrantes de operación, par y velocidad. El cuadrante de par tiene como finalidad seguir o mantener una señal de par, sin embargo, el par máximo a proporcionar depende de la velocidad a la que se encuentre el dinamómetro según la curva de la Fig. 3. En el cuadrante de velocidad, el objetivo es seguir una señal de velocidad que proporciona el usuario sin importar que par se esté aplicando.

Para realizar el control de estos cuadrantes se utilizan dos lazos cerrados, uno de par y otro de velocidad. En el modo de par se adquiere la señal mediante una celda de carga para realimentarla y compararla con la referencia. Este esquema solo funciona para error positivo, ya que el dinamómetro solo frena, es decir, si el par deseado es menor que el par instantáneo, el dinamómetro un par mayor, sin embargo, si el par deseado es mayor al proporcionado, el dinamómetro no puede aportar un par mayor. Para el cuadrante de velocidad la situación es similar a la del par, pues solo funciona para error positivo. Si la velocidad del motor es mayor a la deseada, el dinamómetro frena hasta llegar al valor deseado, si ocurre lo contrario no puede aportar energía para aumentar la velocidad.

2.1 Control de par

Originalmente en este dinamómetro para el control de par se usa una señal de referencia de corriente, que se regula a través de un potenciómetro. El control de corriente que proviene de fábrica del dinamómetro Dynamatic 8060 es establecido a través de un amplificador sumador, el cual se encarga de detectar si el nivel deseado de corriente es el mismo que el que se entrega, si la corriente entregada es mayor o menor, éste se encarga de disminuirla o aumentarla, según sea el caso. Un diagrama del control original de corriente del dinamómetro se muestra en la Fig. 4 (Eaton, 1980).

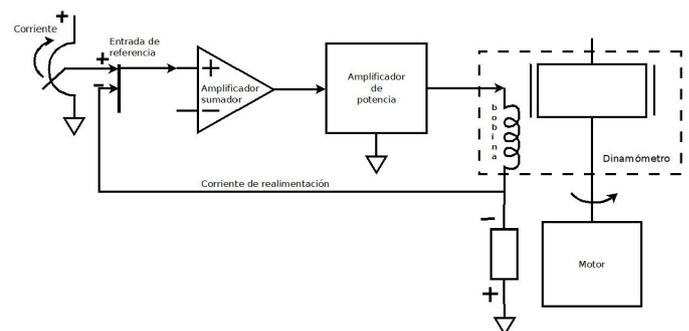


Figura 4. Esquema original del control de par

2.2 Control de velocidad

El dinamómetro originalmente también contaba con un control de velocidad, que se basaba en un circuito que producía pulsos a partir de un engrane de 60 dientes acoplado al eje de rotación y convertía este tren de pulsos en una señal proporcional a la velocidad de rotación. Esta última señal se comparaba, con la referencia obtenida de un potenciómetro y la diferencia, o error, era usada como parte de un control proporcional. Este control de velocidad en la actualidad no funciona.

Parte de la automatización consistió en realizar un control de velocidad, similar al control de par propuesto.

3. DISEÑO DEL CONTROL

3.1 Diseño de control de par

La finalidad del dinamómetro en modo de par es seguir la referencia de par que se le establezca sin importar la velocidad, sin embargo, para este modelo de dinamómetro el par que se establece depende de la velocidad en la que se encuentra este mismo. En la Fig. 5 se muestra de manera general el diseño del control de par del sistema propuesto.

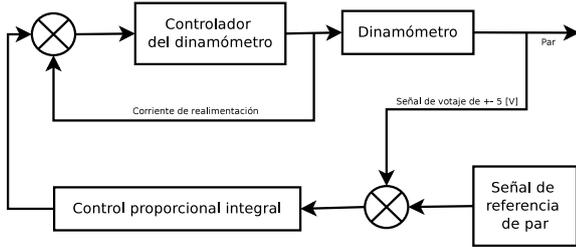


Figura 5. Diseño general del control de par

La ecuación para el control de par es de la forma

$$C_{\tau} = \begin{cases} k_{p1}i_{\tau}(e_{\tau}(t)) + k_{i1} \int_0^t i_{\tau}(e_{\tau}(\tau))d\tau; & e_{\tau}(t) > 0 \\ 0; & e_{\tau}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

donde C_{τ} es el control de par, $i_{\tau}(e_{\tau}(t))$ el porcentaje de corriente aplicada al dinamómetro, dependiendo de $e_{\tau}(t)$ el error de par τ , k_{p1} y k_{i1} son las constantes del controlador PI (proporcional - integral). Se utilizó un control PI por simplicidad, pues debido al ruido del sensor de par se consideró conveniente no añadir la parte derivativa.

3.2 Diseño de control de velocidad

Cuando el dinamómetro funciona en modo de velocidad, la variable de interés es la velocidad de este, en vez del par opuesto. El objetivo en este modo de operación es seguir una trayectoria de velocidad. Si la velocidad del dinamómetro es mayor a la referencia, este opone par hasta frenar a la máquina bajo prueba a la velocidad de referencia. Sin embargo, si la velocidad del dinamómetro es menor a la de referencia, como se trata de un dispositivo pasivo, este no aporta par activo alguno, y se espera que la máquina bajo prueba llegue a la velocidad deseada. En la Fig. 6 se presenta un diagrama esquemático del diseño general del control de velocidad propuesto. El control es similar al control de par, ya que ocupa el mismo módulo del controlador del dinamómetro para la aplicación de par cuando así se requiera.

De manera similar al diseño de control de par, el control de velocidad se basa en la siguiente ecuación:

$$C_v = \begin{cases} k_{p2}i_d(e_v(t)) + k_{i2} \int_0^t i_d(e_v(\tau))d\tau; & e_v(t) > 0 \\ 0; & e_v(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

donde C_v es el control de velocidad, $i_d(e_v(t))$ el porcentaje de corriente aplicada al dinamómetro, dependiendo de

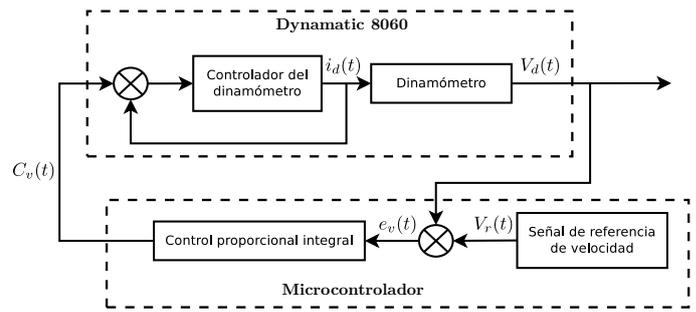


Figura 6. Diseño general del control de velocidad

$e_v(t)$ el error de velocidad v , k_{p2} y k_{i2} son las constantes del controlador PI (proporcional - integral).

4. DISEÑO ELECTRÓNICO

El acondicionamiento de las señales de par y velocidad representa una parte fundamental de este trabajo pues con ello se elimina el ruido a través de filtros y se amplifican las señales.

4.1 Acondicionamiento del puente de Wheatstone

Para la medición de par, se cuenta con una celda de carga sujeta a compresión y tensión, a través de lo cual genera un voltaje positivo o negativo según su configuración.

La celda de carga que se utiliza en este trabajo tiene un principio de funcionamiento basado en galgas extensométricas (Pallás Areny, 2007), la cual, tiene una configuración de puente de Wheatstone (Sinclair, 2001). El diseño general de un puente de Wheatstone presenta cuatro ramas resistivas, donde una de ellas es la galga extensométrica, alimentadas por una fuente de voltaje como se aprecia en la Fig. 7.

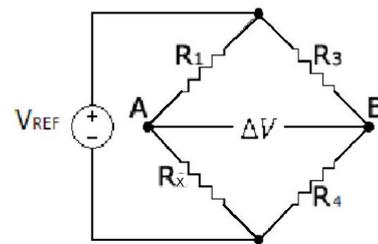


Figura 7. Puente de Wheatstone

La diferencia de potencial entre los nodos AB de la Fig.7 está dada por (Desoer and Kuh, 1969):

$$\Delta V = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_x}{R_1 + R_x} \right) * V_{REF} \quad (3)$$

El acondicionamiento de esta celda de carga tiene la finalidad de amplificar la señal obtenida del puente de Wheatstone para ingresarla al microcontrolador, donde su procesamiento requiere que esté en un intervalo entre -1 y 1 [V]. Para ello se emplean dos etapas de amplificación dadas por un amplificador AD620 (diferencial de instrumentación) en la primera etapa y un LM741 (propósito general) en la segunda etapa. El diagrama general para este circuito se muestra en la Fig. 8.

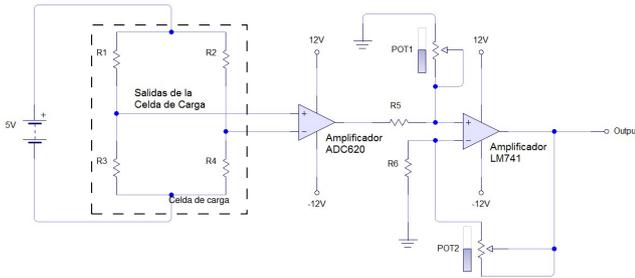


Figura 8. Diseño general de la etapa de acondicionamiento de la señal de la celda de carga

4.2 Acondicionamiento del sensor de velocidad

El dinamómetro cuenta con un engrane de 60 dientes, que activa el sensor de velocidad para proporcionar la velocidad de rotación del dinamómetro. El sensor de velocidad es alimentado por una fuente de 12 [V] y emite un pulso de amplitud constante de 4.5 [V] por cada diente que pasa sobre él, independientemente de la velocidad a la que se encuentre girando el dinamómetro. Lo que varía al aumentar o disminuir la velocidad es la frecuencia de la señal que genera. El principio de funcionamiento del sensor está basado en el efecto Hall, el cual a través de magnetismo detecta a cada diente del engrane y envía un pulso por cada detección que realice. En la Fig. 9 se muestran dos vistas del sensor de velocidad respecto al engrane del brazo de velocidad.

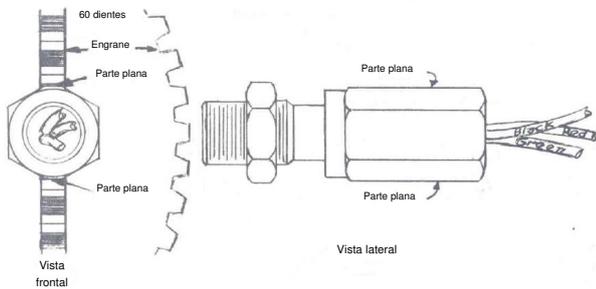


Figura 9. Posición del sensor de velocidad en el dinamómetro.

La salida del sensor de velocidad se puede ingresar directamente al microcontrolador, para realizar el control.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para las pruebas se emplea un microcontrolador *Xmega128A1*, que integra en conjunto con diversos periféricos, la tarjeta de evaluación *XMEGA A1* del fabricante AT-MEL. Este es un dispositivo de baja potencia y alto rendimiento, éste dispositivo permite optimizar el consumo de energía en comparación con la velocidad de procesamiento.

El motor bajo prueba tiene una potencia nominal de 2 [kW] y una velocidad nominal de 1750 [rpm], lo cual redujo el campo de trabajo en el dinamómetro y no permitió utilizar su capacidad máxima.

Cuadrante de par

La señal de onda cuadrada que se ingresó en esta prueba corresponde a un par que establece sus valores entre 3.7 y 7.7 [lb*ft] teniendo un tiempo en cada valor de 7.5 [s] para que se pueda apreciar de mejor manera la respuesta.

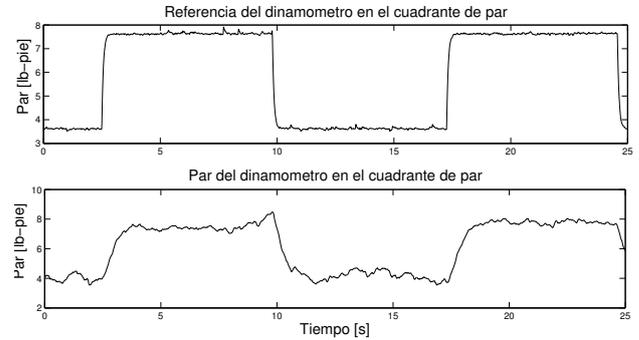


Figura 10. Señal de referencia y medición del par del dinamómetro en modo de operación de par.

En la Fig. 10 se aprecian las señales de referencia en la parte superior de la gráfica y la respuesta del motor que mide el dinamómetro en la parte inferior de la misma. Como se puede apreciar, la dinámica de la señal de respuesta está fuertemente afectada por la respuesta del sistema mecánico del motor, y trata de seguir la referencia. El pico que se observa en la respuesta ocurre justo cuando el motor se libera de carga. Debe notarse además que a bajas cargas el seguimiento es deficiente.

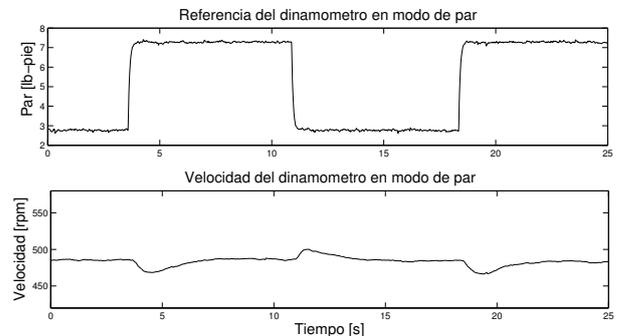


Figura 11. Referencia de par y respuesta de velocidad del motor que mide el dinamómetro en modo de operación de par.

En la Fig. 11 se presenta la respuesta de la velocidad del motor que mide el dinamómetro en el mismo cuadrante de par. En esta figura se aprecia que la velocidad varía poco, es decir, el control del motor a prueba recupera la velocidad que se le asignó y se pueden observar los transitorios al elevar y disminuir el par. La sintonización del controlador PI se hizo por prueba y error, los valores finales fueron 1200 para la constante proporcional y 0.9 para la constante integral.

Las Fig. 12 y 13, muestran las respuestas del motor a prueba, con el control del dinamómetro, ante una referencia dinámica de par de oposición en el dinamómetro de forma triangular y senoidal, las cuales se pueden seguir sin problema alguno.

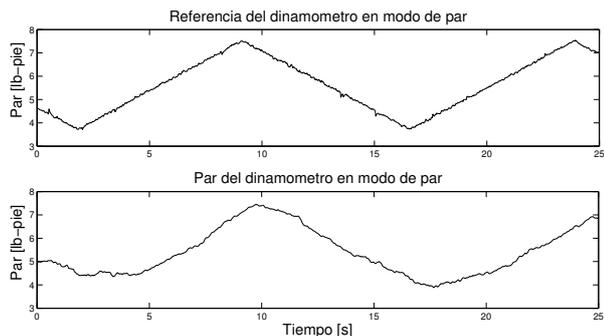


Figura 12. Referencia en forma triangular y respuesta del motor que mide el dinamómetro en modo de operación de par.

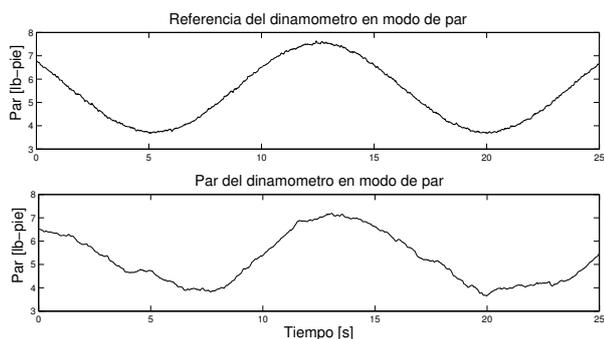


Figura 13. Señal de referencia de onda senoidal y respuesta del motor que mide el dinamómetro en modo de operación de par.

Cuadrante de velocidad

Para probar el dinamómetro en el cuadrante de velocidad se utilizaron dos tipos de referencia triangular, Fig. 14, y senoidal, Fig. 15, se operó el motor de tal forma que, de no recibir carga del dinamómetro, su velocidad de operación fuese constantes y mayor que el máximo de las referencias de velocidad. El controlador *PI* se encarga de frenar al motor eléctrico para que pueda seguir las referencias

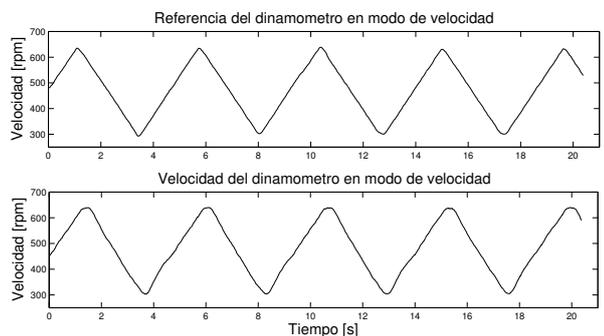


Figura 14. Señal de referencia de onda triangular y respuesta de velocidad del motor que mide el dinamómetro en modo de operación de velocidad.

Por último se realizó una prueba con un segmento de un ciclo de manejo para alta velocidad en la ciudad de México mostrado en la Fig. 16. El control del dinamómetro está en el cuadrante de velocidad.

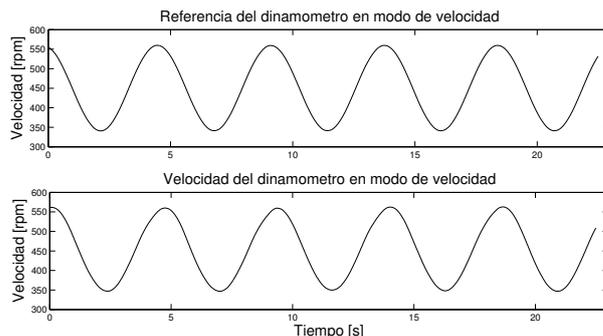


Figura 15. Señal de referencia de onda senoidal y respuesta de velocidad del dinamómetro en modo de operación de velocidad.

La referencia de velocidad para el motor bajo prueba se estableció por arriba de la máxima velocidad de regulación que se pide al dinamómetro. De esta forma cuando el dinamómetro opone un par de freno puede hacer que la velocidad del motor disminuya. El seguimiento es adecuado para la representación que se propone de ciclos de manejo, ya que el dinamómetro consigue controlar a la velocidad que opera el motor. Debe notarse sin embargo que el dinamómetro no puede detener totalmente el motor cuando la referencia de velocidad es muy baja.

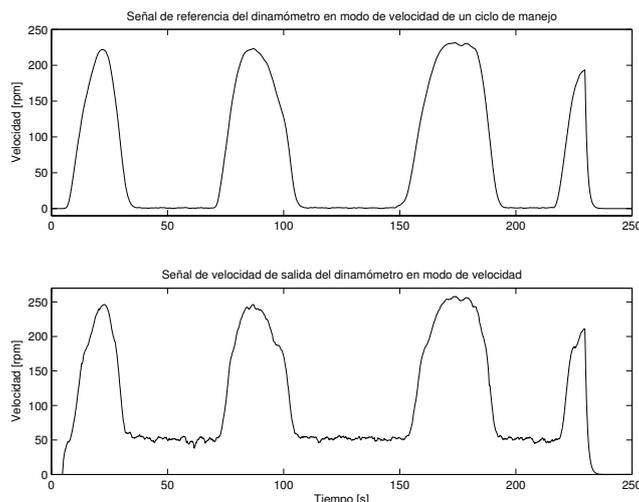


Figura 16. Seguimiento de un segmento de ciclo de manejo.

6. CONCLUSIONES

La elaboración de este trabajo representó un paso importante en el diseño y construcción del banco de pruebas para un vehículo eléctrico híbrido, ya que ahora es posible representar la dinámica de la carga para un vehículo en movimiento.

El diseño e implantación de un sistema digital de control alternativo al sistema analógico original del dinamómetro se desarrolló alrededor del microcontrolador y un conjunto de circuitos para el acondicionamiento de las señales.

El diseño del acondicionamiento de las señales tuvo como objetivo quitar el mayor ruido posible causado por el tipo

de material y el entorno del centro de trabajo, para ello se emplearon dispositivos de precisión con bajo ruido. La segunda parte del objetivo, que corresponde a la implantación del sistema de control, se llevó a cabo con la realización de tarjetas de circuitos impresos.

El sistema de control diseñado cumplió adecuadamente las características de la carga dinámica, es decir, los cambios bruscos de velocidad que existen en la carga dinámica pudieron seguirse adecuadamente. Esto se pudo comprobar con las pruebas realizadas con los diferentes tipos de señales de referencia, donde al final se logra la reproducción de cargas dinámicas presentes en un ciclo de manejo estándar, mostrado en la Fig. 16.

Cabe resaltar que en las pruebas realizadas no se sometió al dinamómetro a ocupar sus capacidades máximas de velocidad y par debido a la ausencia de un motor con mayor potencia. Uno de los puntos para trabajo futuro es utilizar un motor eléctrico de la capacidad al menos 35 [kW], que equivale a la mitad de la capacidad del dinamómetro para que en conjunto con un motor de combustión interna de potencia similar ocupen la máxima potencia de éste. Otro punto importante para trabajo futuro, es diseñar una interfaz entre el usuario y una PC con la finalidad de manipular el sistema completo desde ésta última.

7. AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado bajo el patrocinio de proyectos UNAM-PAPIT IN109414 y CONACYT 103640

REFERENCIAS

- Ahmadi, R., Fajri, P., and Ferdowsi, M. (2013). Dynamic modeling and stability analysis of an experimental test bench for electric-drive vehicle emulation. In *Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2013 IEEE*, 88–94.
- Chalmers, B. and Dukes, B. (1980). High-performance eddy-current dynamometers. *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, 127, 20–28.
- Davies, E. and Wright, M. (1981). High-performance eddy-current dynamometers. *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, 128, 176–179.
- Desoer, C.A. and Kuh, E.S. (1969). *Basic Circuit Theory*. McGraw Hill.
- Duff, J.E. (1947). A high precision dynamometer for small motor measurements. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 66(1), 1344–1348.
- Eaton, C. (1980). *Dynamatic AD-3 Absorbing Dynamometer Control*. Industrial Drives Operations, 3122 14th Avenue, Kenosha, Wi, U.S.A.
- Pallás Areny, R. (2007). *Sensores y Acondicionadores*. Alfaomega.
- Sinclair, I.R. (2001). *Sensors and Transducers*. Newnes.
- Sirohi, R.S. and Krishna, H.C.R. (2004). *Mechanical Measurements*. New Age International Limited.
- Winther, J.B. (1947). Electric eddy current machinery. *Electrical Engineering*, 66(7), 643–646.