

DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE UN WATTHORÍMETRO DIGITAL

DEVELOPMENT OF A DIGITAL WATT-HOUR METER PROTOTYPE

José Castillo Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México, México
jose.castillo@icat.unam.mx

Julián de Gortari Briseño

Universidad Nacional Autónoma de México, México
kiototeko@gmail.com

Alberto Caballero Ruiz

Universidad Nacional Autónoma de México, México
alberto.caballero@icat.unam.mx

Leopoldo Ruiz Huerta

Universidad Nacional Autónoma de México, México
leopoldo.ruiz@icat.unam.mx

Recepción: 21/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

En el ámbito de vehículos eléctricos la información que se deriva del consumo energético de la fuente de polarización permite proponer mejoras y conocer los límites de su desempeño. En este documento, se presenta el desarrollo de un wathhorímetro que se diseñó para conocer el consumo que demanda un vehículo eléctrico a su batería. Se discute los sensores empleados para medir las variables eléctricas de corriente y voltaje, así como sus etapas de acondicionamiento. El instrumento se apoya en un microcontrolador en donde se realiza la adquisición y el procesamiento de las señales, así como el despliegue de la información a través de una pantalla de cristal líquido. Se explica el algoritmo empleado para el procesamiento y se presenta su código principal. Por último, se describe el procedimiento para la validación del prototipo, en donde se compara contra un instrumento comercial y se presentan los resultados obtenidos. A partir de esta información, se concluyó una mejora clara con respecto al medidor comercial, el cual presentó un error del 1.8% en comparación con el prototipo desarrollado.

Palabras Claves: Joulímetro, medidor de corriente, medidor de energía, medidor de voltaje, Watthorímetro.

Abstract

During the design and development processes for electric vehicles, the information from the energy consumption of the polarization source allows proposing improvements and establishing limits on their performance. In this document, the development of a watt-hour meter, that was designed in order to know the consumption that is demanded from the battery in electric vehicles, is presented. The sensors used to measure the electrical variables of current and voltage, as well as their conditioning stages are discussed. The instrument was based on a microcontroller where the data acquisition and the signals processing were performed; the display of the information was carried out by means of a liquid crystal display. The processing algorithm used is explained and its main code is presented. The procedure for the prototype validation is described comparing it against a commercial instrument.

Keywords: *Current meter, energy meter, Joulemeter, Voltage meter, Watt-hour meter.*

1. Introducción

En las últimas dos décadas el crecimiento en el ámbito de vehículos eléctricos se ha hecho fehaciente debido a la clara necesidad de medios de locomoción que no dependan de combustibles fósiles. En particular los vehículos de transporte individual han tomado fuerza alrededor del mundo y en los últimos años, se ha observado el desarrollo de diversos tipos como bicicletas, scooters, triciclos, entre otros, que son impulsados por motores eléctricos y están polarizados por baterías [Affanni, 2005], [Caricchi, 2003], [Jung, 1999], [Texas Instruments, 2014]. Entre los puntos que se tomaron en cuenta para su concepción, se debieron considerar la seguridad del usuario, la ergonomía, la maniobrabilidad, la mecánica, su instrumentación, el control y, claro está, su electrónica de potencia. Todos estos elementos son importantes y están entrelazados, jugando un papel central en el

desempeño del vehículo desde diversos ángulos. En particular, desde un enfoque energético, el consumo que demanda el vehículo a la batería se considera la piedra angular y dicta al final su eficiencia y autonomía [Cheng, 2018], [Chi, 2010]. Por esta razón, disponer de algún medio para conocer los parámetros de corriente, voltaje y potencia, es fundamental para analizar y evaluar las necesidades y limitaciones de energía del sistema. La unidad para medir la energía en el sistema internacional es el Joule (J), sin embargo, en México se acostumbra el uso de los watts-hora (Wh). Por esta razón, el instrumento para medir la energía eléctrica se conoce como Joulímetro o Watthorímetro, y en este documento emplearemos el segundo término. Por otra parte, la información que se genera durante el cálculo de la potencia instantánea da lugar a un patrón de energía que permite conocer los puntos críticos en el desempeño del motor eléctrico, como el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de carga. Con base en esta información, durante el proceso de diseño y desarrollo, es posible proponer mejoras en el hardware y firmware del sistema, en donde interviene tanto la estrategia de control propuesta como la modificación o adecuación de la electrónica pertinente. De igual forma, en este tipo de vehículos también es importante que el usuario cuente con algún medio que le permita conocer el estado de la batería y a partir de esto, estimar la autonomía con la que cuenta. Además, con esta información, el usuario también puede aprender hábitos de manejo que le permita en su momento optimizar el consumo, y de esta forma obtener una eficiencia mayor del vehículo.

Con base en lo expuesto, se presenta el desarrollo de un watthorímetro digital para la supervisión del consumo de la batería de un vehículo eléctrico. El instrumento está encaminado para apoyar el proceso de diseño, desarrollo y validación del vehículo. En el documento se presentan los resultados preliminares del instrumento probado en el laboratorio. Como antecedente para el desarrollo del medidor se pueden mencionar los trabajos [Castillo, 2013], [Kemper, 2013], en donde se desarrolló un sistema de telemetría para medir el consumo doméstico. Por otra parte, también se tuvo un acercamiento con el diseño de un medidor de energía para estimar el consumo de un vehículo eléctrico [De Gortari, 2019], en donde se aprovechó la información de voltaje y corriente que se tomó directamente del

controlador de la etapa de tracción de un vehículo. Esta aplicación contemplaba el uso de telemetría a una estación remota. Si bien los resultados fueron favorables, se concluyó proponer un nuevo diseño con sensores independientes del controlador, sin considerar por el momento la parte de telemetría.

2. Métodos

El procedimiento para determinar la energía en teoría es simple [Chattopadhyay, 2005], [Underwood, 2009]. A partir de medir el voltaje y la corriente de la batería se puede calcular la potencia instantánea. Integrando la potencia instantánea en un intervalo de tiempo, se calcula la energía que consume el sistema en este periodo. Si bien el principio es simple, su implementación involucra diferentes etapas en donde es importante tomar en cuenta las limitaciones prácticas que esto conlleva. En la figura 1 se ilustra el arreglo empleado en el diseño del waththorímetro.

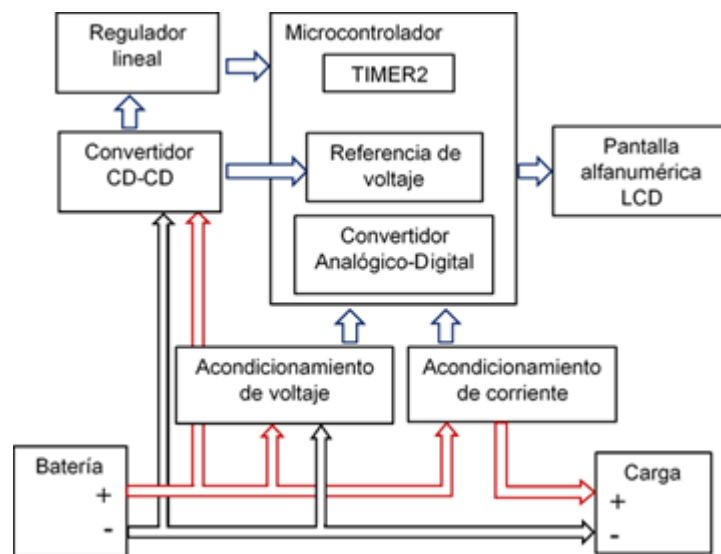


Figura 1 Diagrama esquemático del Watthorímetro.

El instrumento mide el voltaje y la corriente que se demanda a la batería. Estas variables se convierten en valores digitales y son procesadas por un microcontrolador, en donde se calcula la potencia instantánea y a partir de esto se determina la energía que se está consumiendo. La información del voltaje, corriente

y potencia se despliegan en una pantalla de cristal líquido o LCD. En la pantalla también se despliega el tiempo que transcurre del consumo y la energía hasta ese momento. A continuación, será tratada cada una de estas etapas.

El instrumento se polariza a través del convertidor de CD-CD SRH0512 de la compañía XP-POWER. Este integrado produce un voltaje de 12 V a partir de voltajes de entrada que pueden variar en un intervalo de 17 a 72 V, consume una corriente de 3 mA sin carga y es capaz de proporcionar una corriente de salida de 500 mA. Su eficiencia en condiciones de mínimo voltaje de entrada es del 94% y de 89% cuando el voltaje es máximo. Por su intervalo de operación este integrado se conecta de forma directa al voltaje de la batería a través de la terminal J1. Por otra parte, el voltaje de salida o Vpol del CD-CD, se conecta a un regulador 7805 para polarizar la lógica del wathhorímetro. La salida del wathhorímetro es a través de la terminal J2, como se indica en la figura 2.

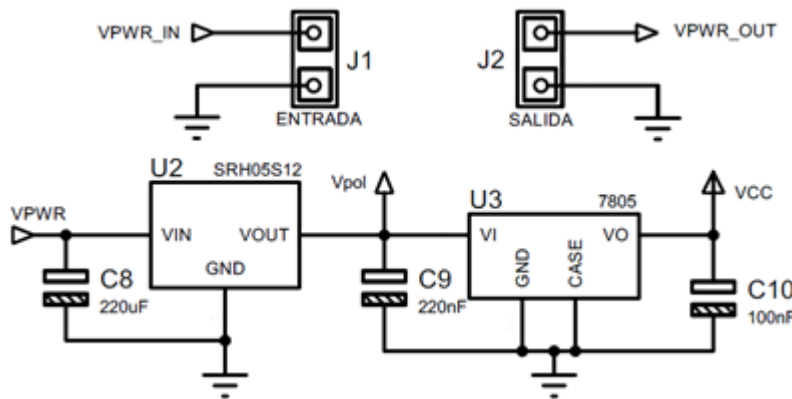


Figura 2 Circuitos de polarización, terminales de entrada y salida.

La lógica del instrumento está gobernada a través de un microcontrolador PIC18F2458 de MICROCHIP, a través del cual se realizan diversos procesos como la adquisición de señales, la conversión analógica-digital y el procesamiento digital de datos. La información que se desprende del procesamiento se despliega en una pantalla de cristal líquido alfanumérica. El microcontrolador usa un cristal de 10 MHz que, mediante un multiplicador de frecuencia basado en un PLL interno, produce una frecuencia de operación de 40 MHz, figura 3. Se muestra un arreglo basado en dos referencias de voltaje LM336 de 2.5 V, que incluyen el arreglo recomendado en

la hoja de especificaciones para reducir su deriva térmica. Este arreglo tiene por objetivo establecer una referencia de voltaje durante los procesos de conversión analógico-digital que más adelante se tratarán.

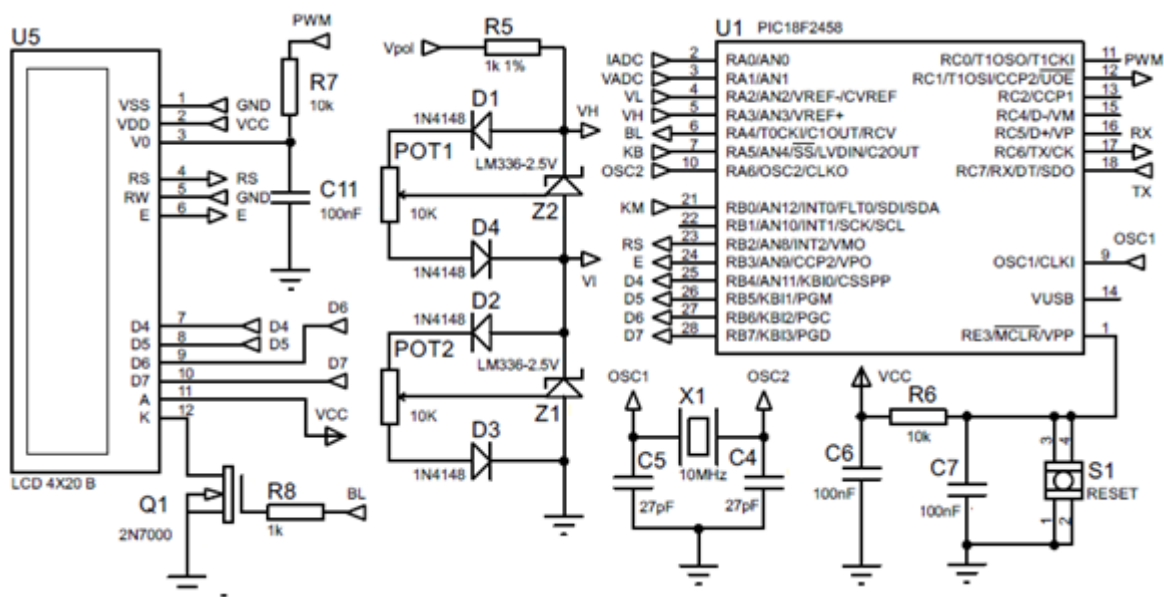


Figura 3 Circuitos de procesamiento y despliegue del Watthorímetro.

Por otro lado, como ya se indicó, en el microcontrolador se desarrolla el procesamiento de las señales; sin embargo, antes de esto es necesario acondicionarlas para que puedan ser convertidas en valores digitales y procesadas. Las variables de interés son el voltaje y la corriente de la batería, que deberán ser acondicionadas a través de algún arreglo o sensor pertinente, como se explica a continuación.

Para medir el voltaje, se usa un divisor de tensión que incluye en su arreglo un capacitor que forma un filtro paso bajo de primer orden a partir de la resistencia de Thevenin equivalente de la red, figura 4. El divisor permite atenuar la señal V_{BAT} , multiplicando su voltaje por un factor de 0.04 o 1/25. En el arreglo se observa que el divisor está referido con respecto al potencial V_L de 2.5 V, que corresponde con la terminal negativa de la referencia del convertidor analógico-digital o ADC. Con esta configuración, tomando en cuenta el valor de V_L y considerando un voltaje de 60 V como valor máximo, se obtiene una atenuación a 2.3 V.

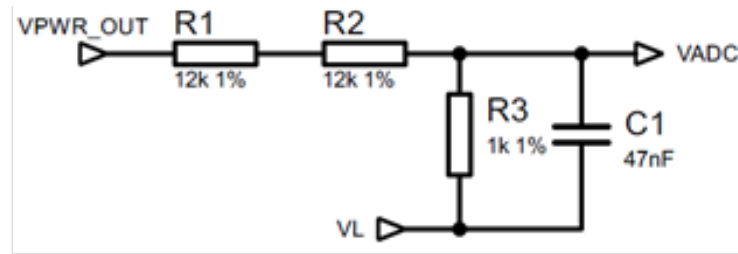


Figura 4 Medición de voltaje por divisor de tensión.

El efecto del voltaje V_L se tratará cuando se explique el ajuste del ADC. La resistencia de Thevenin equivalente del arreglo es de 960Ω y forma un filtro paso bajo de primer orden que tiene una frecuencia de corte alrededor de 3.5 kHz. Este valor no es crítico y se eligió para atenuar el ruido de conmutación, debido a que el medidor se conecta en serie entre la batería y la etapa de potencia del vehículo, que está basada en una modulación de ancho de pulso con una frecuencia de 20 kHz. La amplitud máxima del ruido inducido por la conmutación fue menor de 500 mV, por lo que, la combinación del divisor de tensión y la atenuación del filtro produce en teoría, un ruido residual con una amplitud menor de 5 mV. Sin embargo, considerando que el ruido inducido no es senoidal sino pulsante, la amplitud medida de forma experimental fue menor de 1 mV. Además, es importante mencionar que, en el algoritmo descrito más adelante para el cálculo de la energía, se promedian las muestras tomadas del voltaje, reduciendo aún más los efectos del ruido. La corriente se sensó con el circuito integrado ACS770LCB-050 del fabricante Allegro. Este sensor puede medir señales de hasta 50 amperes de corriente directa o alterna. El arreglo que se usó se presenta en la figura 5.

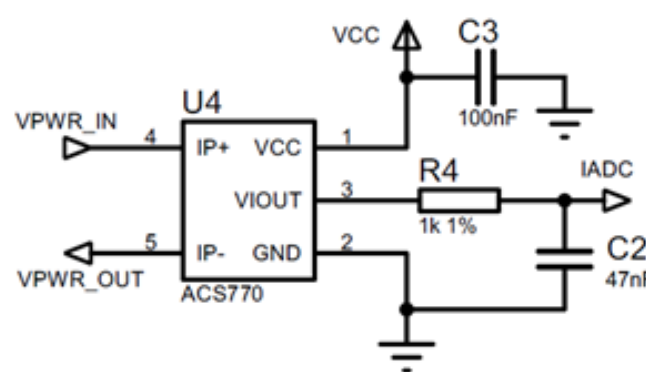


Figura 5 Medición de corriente con el sensor ACS770LCB-050.

El circuito está basado en un dispositivo de efecto Hall que mide el campo magnético que produce el paso de la corriente a través de un conductor. La resistencia del conductor es de $100 \mu\Omega$, de tal forma que la potencia que disipa y la interferencia que le produce al sistema en donde se mide la corriente, se consideran despreciables. Además, la respuesta del integrado está aislada con respecto a su entrada, lo que permite que el sensor no tenga limitaciones para su conexión en cualquier punto del sistema.

El circuito se polariza con una fuente de 5 V y tiene una sensibilidad de 40 mV/A. Debido a que el integrado se polariza con una fuente, la salida tiene un offset de la mitad de este valor, que define el punto cuando la corriente es cero. La señal del sensor se acondiciona además con un filtro paso bajo de primer orden, con una frecuencia aproximada de 3.4 kHz. En este caso, la amplitud del ruido inducido en la polarización de 5 V fue menor de 10 mV, lo cual fue considerablemente menor que en la polarización principal. Por otra parte, debido a que la entrada y salida del integrado están aisladas, fue posible ubicar la salida del integrado en un plano de tierra con cierta inmunidad, por lo que, en combinación con la respuesta dinámica del sensor, la amplitud final del ruido medida de manera experimental en la salida del filtro fue menor de 1 mV. Además, como más adelante se verá, las muestras que se toman de la corriente se promedian para calcular la energía, lo que reduce aún más el efecto del ruido.

Las señales de corriente y voltaje se convierten en valores digitales, a través de un convertidor analógico-digital que es parte de los periféricos del microcontrolador. El convertidor se caracteriza por ser de 12 bits con 10 canales de entrada entre los que se cuentan las terminales para conectar una referencia de voltaje externa. Con el fin de incrementar la precisión de la medición, debido a que la corriente de la batería es de directa y por tanto sus valores son unipolares, la referencia se ajustó para que su nivel inferior V_L fuera de 2.5 V y su voltaje superior V_H de 5 V, de esta forma el valor absoluto de la referencia quedo acotada en 2.5 V. Tomando en cuenta lo anterior, el convertidor analógico-digital presenta una resolución de 610 μ V. Cabe mencionar que, el límite inferior de la referencia coincide con el voltaje de offset del sensor de corriente y con la referencia del divisor de tensión. Por otra parte, para

compensar el corrimiento de la referencia del ADC, después de la conversión y procesamiento del voltaje de la batería se agregó el valor equivalente de 2.5V en la programación del microcontrolador

El ciclo de máquina en el microcontrolador fue de 100 ns, considerando una frecuencia de oscilación de 40 MHz que internamente se divide entre 4. A partir de esto y con base en la hoja de datos, el convertidor se ajustó para que su tiempo de adquisición y conversión fuera de 12.8 μ s más 2 μ s para su registro y almacenamiento, a partir de la atención a una llamada de interrupción.

Para establecer los tiempos de adquisición, procesamiento y sincronía del instrumento, se usó el TIMER2 del microcontrolador. Este periférico se ajustó para generar una interrupción cada milisegundo. La rutina de interrupción del TIMER2, inicia el proceso de adquisición del convertidor analógico-digital. Por su parte, el ADC produce a su vez una interrupción al término de cada conversión. En esta interrupción se realiza la mayor parte del procesamiento de las señales del wattorímetro. De esta forma, mediante las dos interrupciones se adquieren 16 muestras, 8 de voltaje y 8 de corriente, que se promedian para estimar el valor instantáneo de las variables en cada milisegundo, ecuaciones 1 y 2. A partir de estas expresiones, la potencia instantánea en cada milisegundo se calcula con la ecuación 3.

$$V[k] = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 V[i] \quad (1)$$

$$I[k] = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 I[i] \quad (2)$$

$$P[k] = V[k]I[k] \quad (3)$$

El valor promedio de voltaje, corriente y potencia se calculó tomando N valores instantáneos como se indica las ecuaciones 4 a 6.

$$V[j] = \frac{1}{N} \frac{K_v}{K_d} \sum_{k=1}^N V[k] \quad (4)$$

$$I[j] = \frac{1}{N} \frac{K_i}{K_d} \sum_{k=1}^N I[k] \quad (5)$$

$$P[j] = \frac{1}{N} \frac{K_v K_i}{K_d^2} \sum_{k=1}^N P[k] \quad (6)$$

En estas expresiones el valor de N se fijó en 1000, para que el periodo del promedio fuera de un segundo. Las constantes K_v , K_i y K_d , son necesarias para convertir los valores digitales en cantidades que estén acorde con las variables físicas que representan. Las constantes K_v y K_i se determinan con base en el valor presente en la entrada de cada sensor de acuerdo con un valor de salida determinado. Para el caso del sensor de voltaje, este valor de salida es equivalente a un volt, y para el caso del sensor de corriente, se establece en un volt sobre el voltaje de offset. Tomando esto en cuenta, el valor de K_v corresponde con 25 V y el valor de K_i es 25 A. Por otra parte, la constante K_d está asociada con el convertidor analógico-digital y es igual al valor digital que produce el convertidor cuando, en su entrada se presenta una señal de un volt. El valor de K_d es de 1638, considerando que el convertidor es de 12 bits con una referencia de voltaje de 2.5 V.

Con base en la potencia promedio, la energía se calcula como se indica en la ecuación 7. Para que la energía quede expresada en watts-hora, se agregó el valor de 3600 que corresponde al número de segundos en una hora. La variable M es el número total de valores promedio que se consideran en el cálculo.

$$E = \frac{1}{3600} \sum_{j=1}^M P[j] \quad (7)$$

Por último, durante la interrupción se lleva la cuenta del tiempo total que ha durado el proceso. La figura 6 se presentan el diagrama de flujo del algoritmo empleado.

3. Resultados

El prototipo se desarrolló en un circuito impreso de una cara y en dos partes, ver figura 7. La tarjeta de la izquierda en la imagen concentra la mayor parte de los circuitos del medidor; en tanto que, en la tarjeta de la derecha se colocó la pantalla

LCD y un teclado básico de 4 teclas. La quinta tecla en el extremo superior derecho es el botón de restablecimiento del sistema. Cabe mencionar que, aunque en esta etapa el teclado no se usó, resultó útil durante las pruebas de depuración del programa. En la imagen se aprecian las terminales para conectar la batería y la carga.

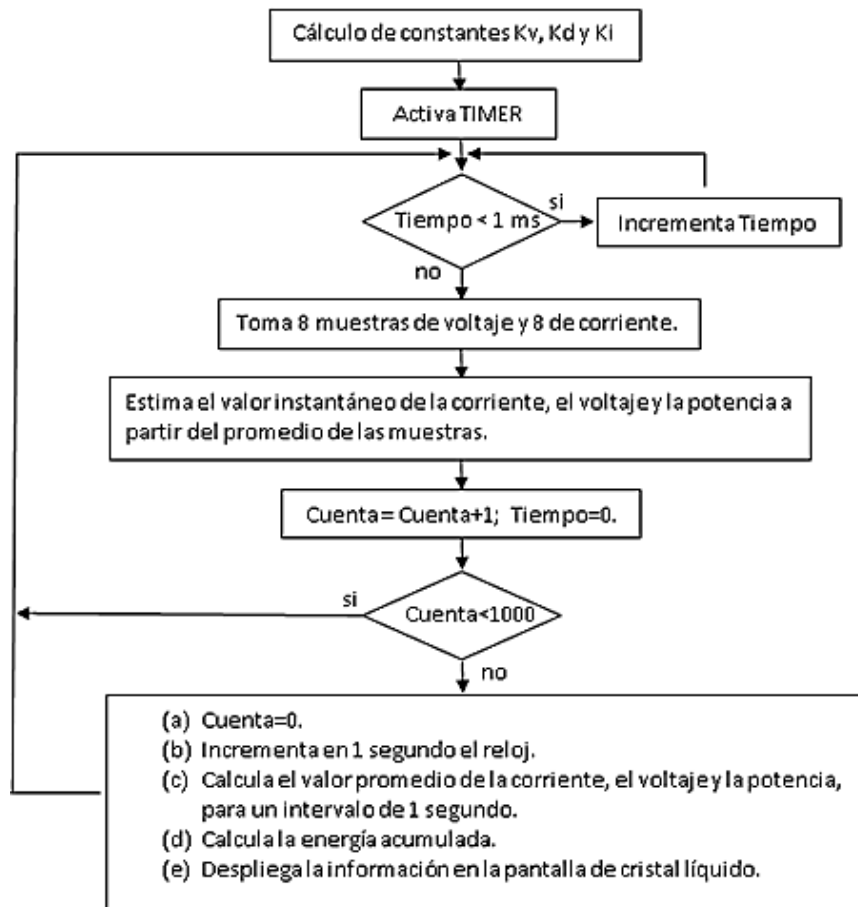


Figura 6 Diagrama de flujo del algoritmo.

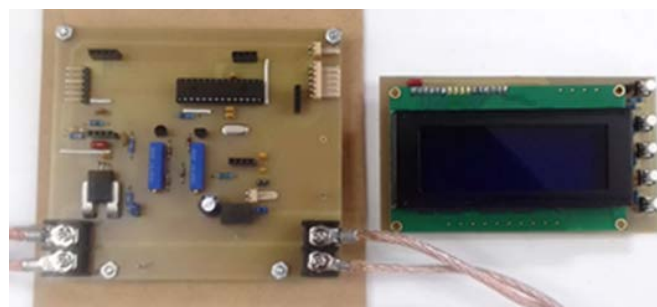


Figura 7 Electrónica del medidor.

Se realizaron varias pruebas para evaluar el comportamiento de circuito y en este documento se presentan dos en particular. En la primera, para validar el desempeño, se usó un medidor comercial de la marca DROK modelo 200141, como medidor de referencia [Drok, 2019], como se aprecia en la figura 8. Este medidor requiere una resistencia shunt para la corriente, es un multímetro 4 en 1 en donde se despliegan las variables de voltaje, corriente, potencia y energía. Permite medir voltajes desde 6.5 V hasta 100 V y corrientes de hasta 100 A, dependiendo de la resistencia shunt.



Figura 8 Arreglo propuesto para validar el Watthorímetro.

El medidor se conectó en serie con el prototipo desarrollado, además de usar dos multímetros FLUKE 115, para medir el voltaje y la corriente. Para la prueba, se usó como elemento de carga una resistencia de 16.3 Ω , La prueba duró alrededor de 26 minutos y en la imagen se aprecia las lecturas del prototipo, el medidor comercial y los multímetros.

Para la segunda prueba, se midió el consumo que tuvo un motor sin escobillas y su electrónica de potencia asociada, figura 9. Se retiraron los multímetros, pero se mantuvo el medidor de referencia. En la imagen se aprecia que el motor está en marcha y la imagen se tomó cuando la prueba alcanzó el tiempo de una hora.

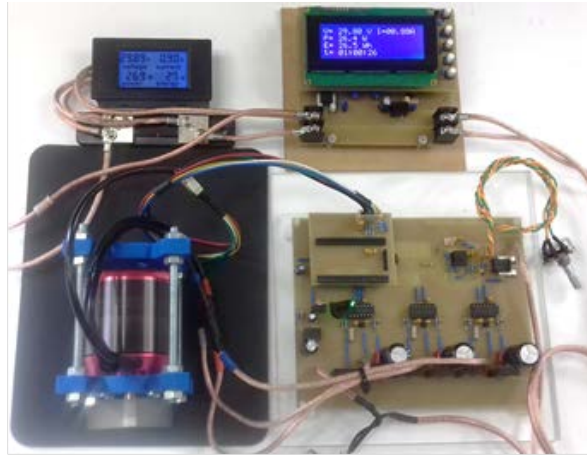


Figura 9 Prueba con un motor eléctrico y su electrónica de potencia.

4. Discusión

Las lecturas de voltaje y corriente del prototipo, en la figura 7, están acorde con las lecturas de los multímetros, en tanto que el medidor comercial presenta pequeñas diferencias en el despliegue de la información. Sin embargo, es justo comentar que el costo de este medidor es modesto, alrededor de \$ 24 dólares. La diferencia en las lecturas se puede deber a diversos factores, por ejemplo, para medir la corriente, el prototipo desarrollado usa un circuito integrado que está calibrado con tecnología láser, en tanto que el medidor de referencia emplea una resistencia shunt y por tanto una electrónica adicional para su acondicionamiento. En el caso del voltaje, en el medidor propuesto se usaron resistencias de precisión del 1% y el ajuste final se realizó por software. Se desconoce el método que se usó para medir el voltaje en el caso del medidor de referencia.

Si bien, algunos cálculos fue posible realizarlos con aritmética de punto fijo y corrimientos de bits en el caso de algunas divisiones, también fue necesario el uso de la aritmética de punto flotante. Con el fin de reducir los tiempos de procesamiento, el cálculo de las constantes finales antes del despliegue de la información se realizó al inicio del programa.

Como se había mencionado, los parámetros del convertidor analógico-digital se ajustaron para que el tiempo de la adquisición y conversión de las muestras fuera de 12.8 μ s; sin embargo, el tiempo final requerido fue de 30 μ s, dando un total de

480 μ s para la toma y procesamiento de 16 muestras. Esta diferencia de tiempo se debió a que el circuito se programó en lenguaje C, además de usar algunas de las funciones que ofrece el compilador CCS. Aunque en lenguaje C se tiene la posibilidad de programar a bajo nivel, a final de cuenta es un lenguaje de alto nivel que es estructurado y posee sentencias y funciones que simplifican la programación. Esto tiene un costo y es menos eficiente desde el punto de vista de la ejecución del código, en comparación con el ensamblador nativo del microcontrolador. Sin embargo, es importante resaltar que el costo se justifica cuando su uso facilita la tarea de la programación, además de contar en este caso con tiempo suficiente, alrededor de 500 μ s, para realizar los cálculos necesarios antes de cumplir el ciclo de un milisegundo de la interrupción del TIMER2.

Por otro lado, en cuestión de dimensiones, ambos sistemas son similares si se considera el espacio que ocupa la resistencia shunt. Es claro que las dimensiones de la tarjeta impresa en la figura 6, están sobradas y la tecnología que se usa es through-hole, pero también es importante resaltar que se trata de un prototipo. Tomando en cuenta esto, hay dos mejoras sustanciales que se desean a realizar en un trabajo futuro, la primera consiste en agregar un transmisor inalámbrico para mandar la información a una estación remota, en donde puede ser procesada y analizada. La estación puede ser una computadora, para cual un transmisor de radiofrecuencia con comunicación UART se puede usar. Otra posibilidad es módulo Bluetooth con comunicación UART que establezca la comunicación con un teléfono celular, de esta forma la pantalla LCD se puede omitir.

La segunda mejora incluye el registro de la distancia recorrida por el vehículo a través de algún sensor de posición para que de esta forma se estime el desempeño de los kilómetros recorridos por kWh. Parte de este trabajo ya se ha desarrollado, por esta razón, aunque aún no se prueba en este medidor, el circuito impreso incluye los conectores apropiados para estas opciones, figura 7.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño preliminar de un wathhorímetro digital. El instrumento se desarrolló para su aplicación en vehículos de transporte individual.

El desempeño del prototipo se comparó contra un medidor comercial y se emplearon dos multímetros para ratificar las lecturas obtenidas de voltaje y corriente. Las lecturas obtenidas por el prototipo fueron coherentes con las mediciones de los multímetros; en tanto que las mediciones obtenidas por el instrumento comercial tuvieron pequeñas diferencias. Tomando este hecho como punto de partida, el error del medidor comercial fue mayor y se reflejó en el cálculo de la energía que tuvo un error del 1.8% en comparación con el prototipo desarrollado. Por último, en un trabajo futuro, se está considerando dos mejoras importantes que tienen relación con la telemetría y la inclusión de un medidor de distancia que, en conjunto con el watthorímetro, permitirá estimar la autonomía y analizar los datos recabados del vehículo eléctrico cuando esté sometido en pruebas de campo.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Affanni, A., Bellini, A., Franceschini, G., Guglielmi, P., Tassoni, C. Battery choice and management for new-generation electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Pages: 1343 - 1349 vol. 52. 2005.
- [2] Caricchi, F., Del Ferraro, L., Giulii Capponi, F., Honorati O., Santini, E. Three-wheeled electric maxi-scooter for improved driving performances in large urban areas. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003. IEMDC'03. Pages: 1363 - 1368 vol.3. 2003.
- [3] Castillo, J., Kemper N., Sovero, G. Medición inalámbrica del consumo eléctrico para el ahorro de energía en edificios, X SEMETRO 2013, 10th International Congress on Electrical Metrology, Instituto Nacional de la Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina. ID164. Septiembre 2013.
- [4] Chattopadhyay Sandip, AN939 Designing Energy Meters with the PIC16F873A, Microchip Technology Inc. 18 pages. 2005.
- [5] Chi-Tong Huang, Chun-Liang Lin, Chia-Sung Lee. Efficient energy management for electrical scooters. 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON) IEEE Conferences. Pages: 772 – 776. 2010.

- [6] Cheng-Han Lin, Shu-Yuan Ye. Design of Intelligent Electric Scooter with a Cloud Monitoring System. 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), IEEE Conferences. Pages: 161 – 164. 2018.
- [7] De Gortari, J. Sistema inalámbrico para la medición de energía de un auto eléctrico. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2019.
- [8] Drok. <https://www.droking.com/power-monitor-4in1-digital-voltmeter-ammeter-power-meter-energy-meter-dc-6.5-100v-100a-10kw-9999kwh-multifunction-digital-meter-resistor-shunt>. 2019.
- [9] Jung-Shan Lin, Li-Chen Fu. Model analysis and controller design of electric motorcycles. Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251), IEEE Conferences. Pages 2698 – 2702 vol.4. 1999.
- [10] Kemper, N., Castillo J., Ochoa, L., Soto, A. Concentrador inalámbrico para la gestión de consumos eléctricos en edificios, X SEMETRO 2013, 10th International Congress on Electrical Metrology, Instituto Nacional de la Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina. ID161. Septiembre 2013.
- [11] Texas Instruments, Inc. Hardware Design Considerations for an Electric Bicycle. Using a BLDC Motor. Application Report SLVA642. 24 pages. June 2014.
- [12] Underwood, S., Chan, V., Venkat, K. Implementation of a Three-Phase Electronic Watt-Hour Meter Using the MSP430F471xx, Texas Instruments, Application Report SLAA409A, June 2009.