

SISTEMA DE MONITOREO INTELIGENTE DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN CASAS ELÉCTRICAMENTE SUSTENTABLES

Smart Monitoring System of Electrical Consumption in
Electrically Sustainable Houses

Luis Felipe Osegueda Morales

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
luisosegueda@outlook.com

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del desarrollo de un sistema de monitoreo inteligente del consumo de energía eléctrica que examina cada uno de los contactos instalados en una vivienda, lo cual permite saber cuál es el consumo por área o por dispositivo conectado a la red. Este dato ayuda a que el usuario modifique el patrón de uso o consumo por cada uno de los aparatos conectados a la red eléctrica. La conexión del sistema a la nube o sistema de almacenamiento de datos a internet contribuye a disponer de los datos del consumo en cualquier lugar donde se tenga una conexión a internet. La escalabilidad del proyecto es uno de los factores principales, ya que este sistema puede ser utilizado por sistemas inteligentes como lo son de predicción y de control del consumo de energía eléctrica.

Palabras clave: sistema de monitoreo, consumo eléctrico, monitoreo inteligente de energía eléctrica.

ABSTRACT

This paper presents the results of the development of an intelligent monitoring system for electricity consumption. The system monitors each of the outlet boxes installed in a home, which allows knowing the area and device consumption connected to the network, this data allows the user to modify the use or consumption pattern for each of the connected devices to the electrical network. The connection of the system to the cloud allows to have the consumption data in any place with Internet connection. The scalability of the project is one of the main factors, since this system can be used by intelligent systems such as those of prediction and control of the consumption of electricity.

Keywords: monitoring system, electric consumption, smart monitoring of electricity

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se considera que la generación de energía eléctrica está totalmente relacionada con el desarrollo de los países, y México no es la excepción. En 1899, la capacidad instalada para generar energía eléctrica en México era de 31 039 kW en industrias textiles y mineras, todas de inversión privada, la capacidad aumentó hasta llegar a 1450 MW en 1951, en 1987 la capacidad instalada había alcanzado 23.15 GW y para el 2011 ese valor estaba situado en 52 GW [1].

Los dispositivos y servicios de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) se están expandiendo día a día en todos los aspectos de la vida humana. A raíz de un mayor enfoque mundial en los impactos ambientales sobre el consumo de energía en general, se ha tomado en cuenta el consumo eléctrico relacionado con las TIC. Heddeghem *et al.* [2] evaluó que el consumo eléctrico de las TIC en su etapa de uso ha evolucionado de 2007 a 2012 en función de tres categorías principales: redes de comunicación, computadoras personales y centros de datos. Las estimaciones muestran que el incremento anual de las tres categorías individualmente (10%, 5% y 4%, respectivamente) es mayor que el crecimiento general sobre el consumo eléctrico mundial en el mismo periodo que representa el 3%. La participación relativa en este subconjunto de productos y servicios de TIC en el consumo eléctrico total a nivel mundial ha aumentado del 3,9% en 2007 al 4,6% en 2012.

El ahorro en el consumo de energía y de agua representa uno de los desafíos más importantes para los gobiernos de todo el mundo. Los desarrollos residenciales en México ofrecen una buena manera para que la gente pobre pueda comprar una casa. Tolodano *et al.* [3] presentó un nuevo enfoque en el desarrollo residencial para alcanzar buenos ahorros en el consumo de energía y agua. La



herramienta es un sistema de control del consumo de energía y agua, cuya metodología consiste en mostrar las fechas de consumo al cliente para que pueda tomar conciencia sobre el consumo de energía y agua por día. El resultado obtenido es un ahorro de 13.43% en energía eléctrica, 10.18% relacionado con el ahorro de agua y 9.13% menos de consumo de gas.

Para llegar a una disminución del consumo de energía eléctrica es necesario implementar acciones correctivas, que actualmente son tomadas por los habitantes del edificio, por lo que, si las personas desconocen cuál es su consumo de energía eléctrica no pueden realizar ninguna acción. Webb *et al.* [4] mostró cómo el uso del sistema de consumo de energía en los hogares es benéfico y ayuda a reducir este tipo de energía. En su trabajo, hizo un estudio para conocer las creencias de las personas sobre el uso de la electricidad y los sistemas de control del consumo. Él monitoreó el consumo de energía eléctrica de 348 participantes. A través de subconjunto de 38 participantes que utilizó un sistema de monitoreo, demuestra cómo el uso de estos dispositivos reduce el consumo de energía.

El rápido desarrollo de la población mundial, la construcción y la aplicación de la tecnología en la actualidad han provocado un rápido incremento en el consumo de energía eléctrica. Por lo tanto, la gestión eficiente de los pronósticos de consumo de energía en los edificios es importante para tomar decisiones sobre el ahorro y el desarrollo de los sistemas de energía en algunos lugares. Ahmad *et al.* [5] comprobó que para pronosticar el consumo de energía eléctrica en edificios se pueden utilizar algunos métodos de inteligencia artificial como la máquina de vectores de soporte (SVM) y la red neuronal artificial (ANN). Ambos métodos son ampliamente empleados para pronosticar el consumo de energía. No obstante, existe un método híbrido que usa los dos antes mencionados y que puede obtener mejores resultados.

El pronóstico preciso sobre el consumo de energía eléctrica tiene una importancia primordial en el diseño energético en los países en desarrollo. Durante la última década se han empleado nuevas técnicas para planificar el consumo de energía y predecir con precisión las necesidades futuras en el área. Entre éstas, se encuentran la máquina de vectores de soporte y la máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados (LS-SVM) que se han adoptado para obtener pronósticos de energía eléctrica. Al respecto, Kaytez *et al.* [6] implementó el método LS-SVM para predecir el consumo de energía eléctrica en Turquía. Además de considerar el análisis de la regresión tradicional y las redes neuronales artificiales. Los resultados de la predicción, al compararlos entre ellos, indican que el modelo LS-SVM es un método rápido y preciso.

De la misma manera, otras alternativas han sido utilizadas para la predicción del consumo de energía eléctrica. Li *et al.* [7] empleó diferentes combinaciones para mejorar la predicción del consumo: optimización de enjambre de partículas y algoritmos genéticos aplicados para modificar los pesos en la red neuronal, y el análisis de componentes principales para saber cuáles entradas son las adecuadas. También, presentó que al usar un híbrido en conjunto con las redes neuronales se obtiene un mejor resultado. Asimismo, Kouhi *et al.* [8] utilizó un sistema híbrido partiendo del perceptrón multicapa y del método Levenberg-Marquardt y el diferencial evolutivo.

La regresión de vectores de soporte (SVR) se ha utilizado con éxito para resolver problemas de regresión no lineal y series temporales relacionadas con el pronóstico del consumo de energía en los edificios. Zhang *et al.* [9] desarrolló un modelo de predicción denominado diferencial evolucionado (DE) con modelos SVR. El algoritmo DE se empleó para determinar los pesos que le corresponden a cada modelo. El algoritmo se proporcionó con datos de consumo de energía de series temporales de un edificio institucional de Singapur.

Las casas eléctricamente sostenibles o edificios de energía cero han sido propuestos en los últimos años como alternativa para reducir la contaminación generada por la energía eléctrica. Existen diferentes propuestas, pero nos enfocaremos en el caso particular que involucra sólo el sistema de energía eléctrica, el cual está compuesto por un sistema de generación (paneles solares), un sistema de almacenamiento (baterías) y un sistema de distribución.

La energía hoy en día es un tema muy popular, debido a que cada vez el avance tecnológico en cuestión de aprovechamiento de la energía es mayor, sin embargo, existen métodos para el ahorro y conservación de la energía eléctrica donde el usuario es el que tiene que realizar una acción para obtener ese ahorro. En el presente artículo se desarrolla un sistema de aprovechamiento de la energía eléctrica, tomando en cuenta la generada y la consumida para así tener un mejor aprovechamiento. Asimismo, está enfocado en la etapa del monitoreo del consumo de energía eléctrica propuesto para su implementación en un sistema de predicción y control en una vivienda eléctricamente sostenible.

METODOLOGÍA

El sistema consiste en el monitoreo del consumo de energía eléctrica, el cual está instalado en cada toma de corriente eléctrica alrededor de la vivienda y será conectado a un sistema de predicción del consumo y se comparará con el sistema de cuantificación de la energía generada. Cuando la energía, que se consuma, sea mayor a la energía generada, el sistema desconectará los aparatos no necesarios para conservar la energía. En conjunto, este sistema aprovechará la energía y evitará que la vivienda se quede sin ella durante la noche.



Figura 1. Proceso general del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo toma los valores de corriente y voltaje por medio de la adquisición de las señales en un microcontrolador, al tenerlos calcula la potencia en el dispositivo y luego el consumo eléctrico. El cálculo del consumo se envía a la plataforma para que el usuario pueda disponer de esa información desde cualquier punto y en el momento que lo requiera, contando con una conexión a internet. En la plataforma se guardan los valores de voltaje, corriente y potencia RMS, así como el consumo eléctrico del dispositivo durante un tiempo determinado.

Al poseer en casa diferentes electrodomésticos o dispositivos que consumen energía de manera continua, intermitente y esporádica, el consumo de energía es variable y no se puede representar con una línea recta. También depende de diferentes factores, por ejemplo, las personas que están en la vivienda, clima, hora del día, día de la semana, entre otros. La predicción se realizará con esta información ya que es considerada importante.

El sistema de monitoreo está construido por una red de sensores que están instalados en cada tomacorriente e integrados por un sensor de corriente y uno de voltaje para obtener la potencia eléctrica y, por medio de las unidades de tiempo, el consumo eléctrico. Al sumar los consumos se obtiene la potencia utilizada por cada dispositivo y por la vivienda en total. Estas cifras pueden pronosticar el consumo eléctrico y así tomar decisiones para conectar y desconectar los dispositivos dependiendo la prioridad del dispositivo.

El dispositivo toma 20 muestras de corriente y voltaje en un período de la onda senoidal para así calcular la potencia que se conoce como potencia instantánea, obteniéndola con la magnitud de corriente y voltaje en un



instante determinado. Los sensores están conectados a un microcontrolador, el cual es el encargado de hacer el cálculo y mandar la información obtenida a una plataforma en la red cada 15 segundos. La información es almacenada en la red y tomada después para realizar la predicción. La plataforma Thingspeak es una plataforma que te permite almacenar información durante periodos de tiempo y es fácil de obtener con sistemas Mathworks.

La predicción se realizará por medio de una red neuronal en Matlab con los diferentes factores mencionados anteriormente, ya que este sistema permite realizar una predicción más apegada a la realidad y en consecuencia más fiel al modelo.

Medición de corriente

La corriente es obtenida por medio de un sensor de corriente ACS722, el cual está disponible en diferentes versiones (sólo cambia la corriente máxima medible por el sensor y el tipo de corriente, alterna o directa). El sensor entrega a su salida un voltaje propor-

cional a la corriente que fluye entre sus terminales principales, lo que genera a su salida una señal idéntica a la señal de corriente principal.

La corriente se calcula con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{V_{\text{sensor}} - 1.65}{0.066} \quad (1)$$

Donde:

V=la corriente instantánea

V_{sensor} =el voltaje a la salida del sensor de corriente

Medición del voltaje

El voltaje es conseguido mediante un transformador de aislamiento con relación 1:1 conectado a un divisor de voltaje proporcional a la entrada de un seguidor de voltaje. La señal de voltaje obtenida es proporcional a la del voltaje de línea en el circuito de medición.

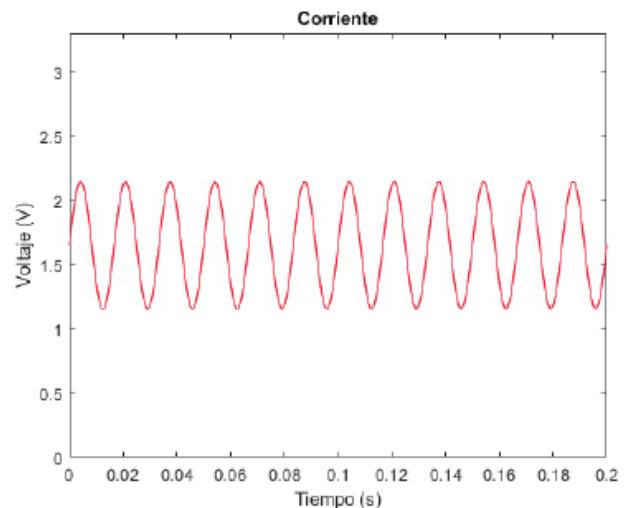
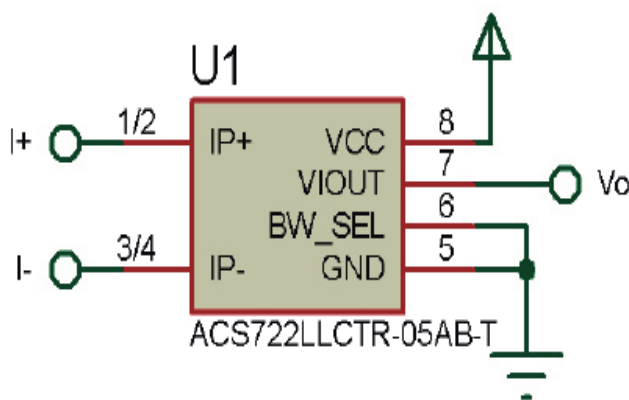


Figura 2. Circuito para la medición de corriente y señal de salida

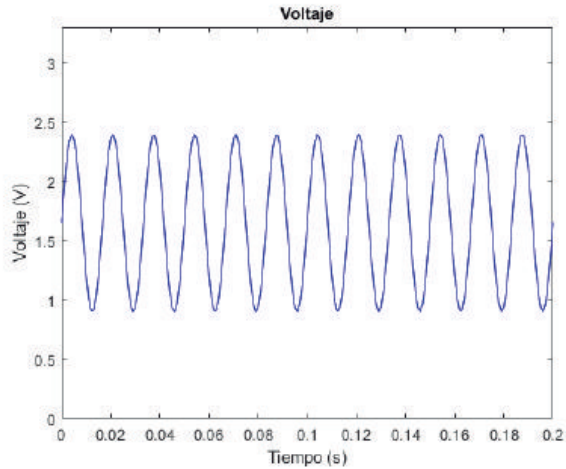
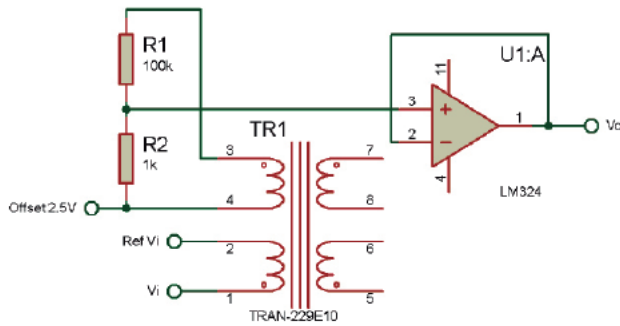


Figura 3. Circuito para la medición de voltaje y señal de salida.

El voltaje se calcula a través de la siguiente formula:

$$V = \frac{V_{\text{sensor}} - 1.65}{0.00943}$$

(2)

Donde:

V = el voltaje instantáneo

V_{sensor} = el voltaje a la salida del sensor de voltaje

Cálculo de la potencia

La potencia instantánea es obtenida por medio del cálculo del voltaje y la corriente instantánea que están presentes en el circuito. Esto se realiza para cada uno de los dispositivos conectados en el sistema de monitoreo. La fórmula para calcular la potencia es:

$$P = V * I \quad (3)$$

Donde:

P = la potencia instantánea

V = el voltaje instantáneo

I = la corriente instantánea

El consumo es calculado con la siguiente fórmula:

$$Q = \left(\frac{P}{1000} \right) * T \quad (4)$$

Donde:

Q = el consumo (kW/h)

P = la potencia

T = el tiempo de conexión de la carga

Para este caso el valor eficaz de la potencia se obtiene calculando el valor cuadrático medio

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i * I_i)^2}{n} \quad (5)$$

Donde:

P = el valor eficaz de la potencia en un ciclo de la onda senoidal

V = el voltaje instantáneo

I = la corriente instantánea

n = el número de muestras en un periodo de la onda senoidal

Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo para un sistema es importante. Por el teorema de Nyquist éste debe ser cuando menos dos veces el valor de la frecuencia de la onda a medir. Para el caso de México, la frecuencia de la señal de corriente eléctrica convencional es de 60Hz, por lo que la frecuencia de muestreo debe de ser cuando menos cada 8.33 m. El tiempo de muestreo propuesto es de 0.5 m para ob-



tener una señal continua y sin saltos abruptos, también ayuda a no medir ruido contenido en la señal proveniente del sensor de corriente y al sensor de voltaje.

Cruce por cero

El cruce por cero es utilizado para tomar un número determinado de valores durante el periodo de la señal de voltaje obtenida directamente de la red. La señal de cruce por cero es conseguida por medio de la señal de voltaje en la entrada y comparada con un voltaje fijo que es la referencia. Un amplificador operacional es el encargado de realizar esta tarea y, como la señal de entrada es una señal senoidal con un periodo determinado, la señal de salida es una señal cuadrada con el mismo periodo que la señal de voltaje de línea.

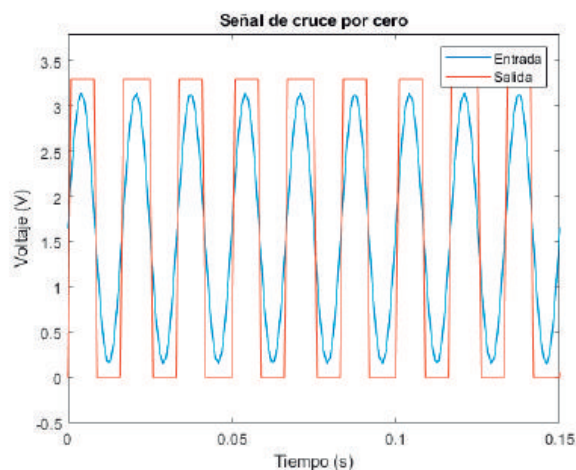
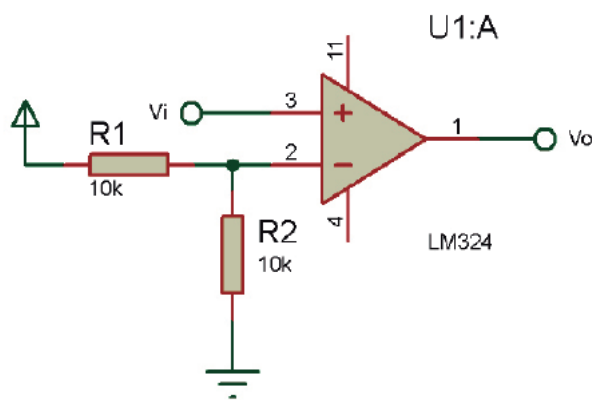


Figura 4. Cruce por cero. Comparador y señal resultante.

Programa del microcontrolador

El programa del microcontrolador está basado en la función de los microcontroladores de Gama alta de Microchip llamada Real Time Operative System (RTOS), el cual ayuda a optimizar el tiempo utilizado por el microcontrolador para llevar a cabo todas las funciones necesarias en el proceso de medición, transmisión de datos y activación/desactivación de energía en los contactos.

Almacenamiento y presentación de datos

Después de la adquisición de datos, éstos son almacenados en una plataforma virtual llamada Thingspeak que es muy versátil y tiene algunas herramientas para el tratamiento de datos. Los datos son mandados a la nube con un radio WiFi conectado al microcontrolador vía UART y enlazado a una red inalámbrica con conexión a internet. Para enviar los datos se especifica el canal y las claves necesarias para actualizarlos en la plataforma.

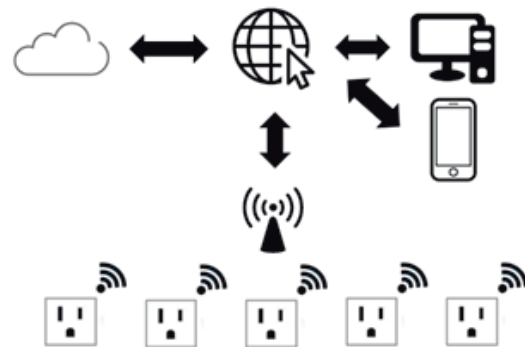


Figura 5. Intercambio de datos entre la plataforma, dispositivos y contactos.

Los diferentes datos son presentados en la plataforma Thingspeak, mediante gráficas de consumo instantáneo y consumo acumulado, para saber en qué momento se tiene más consumo y cuál es el consumo total acumulado en ese aparato en especial.

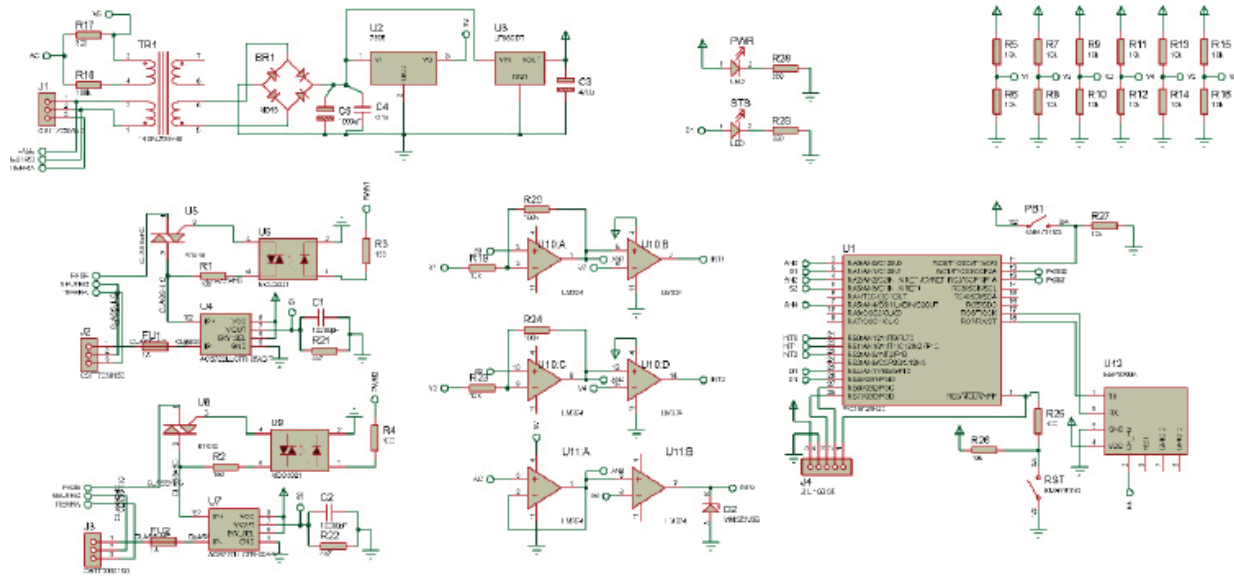


Figura 6. Diagrama electrónico.

El sistema es alimentado por la misma tensión de línea por medio de un transformador de voltaje que tiene dos salidas de 5 volts. Este voltaje es rectificado por medio de un puente rectificador y filtrado por un par de condensadores, cuenta con dos sensores de corriente y el sensor del voltaje de línea, todo esto alimentado a 3.3 volts y utilizando dispositivos XLP de muy bajo consumo para disminuir el consumo generado por el sistema de monitoreo, ya que el sistema también representa una carga energética para nuestro sistema de distribución. La etapa de acondicionamiento de las señales tiene algunos amplificadores operacionales en su configuración de seguidor de voltaje, amplificador no inversor y comparador, y cuenta con un radio transmisor receptor WiFi, el cual se utiliza cada determinado tiempo para enviar la información por medio de una red WiFi.

La tarjeta resultante tiene dos sensores de corriente y uno de voltaje de línea para realizar los cálculos de consumo y para conectar a ella hasta dos elementos o circuitos, dado que los contactos comúnmente instalados vienen en pares y es necesario tomar el consumo de cada uno de ellos, tomando en cuenta la potencia máxima que soporta el sensor de corriente. También cuenta con un microcontrolador 18F25K20 que se encarga de hacer el cálculo del consumo y enviar la información a la plataforma por medio del módulo WiFi ESP-01S. Se le han colocado un par de fusibles como protección de los sensores de corriente, así también contiene la electrónica de acondicionamiento de la señal proveniente de los sensores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizaron diferentes electrodomésticos para ver el comportamiento en señal de corriente y voltaje como lo son: refrigerador, estufa, bombilla, televisión, cafetera, calefactor, plancha, laptop y monitor por mencionar algunos. Cada aparato tiene un consumo diferente y la señal de la onda es distinta dada la naturaleza del dispositivo.

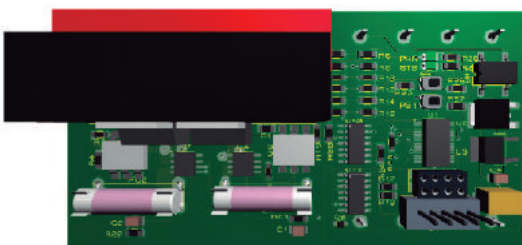


Figura 7. Prototipo resultante



Tabla 1. Comparación entre las mediciones de un multímetro comercial y el dispositivo de medición

	Medidos			Dispositivo		
	Voltaje	Corriente	Potencia	Voltaje	Corriente	Potencia
Refrigerador	120.3	1.56	121	120.1	1.53	124
Estufa	121.5	0.33	41.1	121.2	0.31	40.5
Televisión	121.6	0.42	31.2	121.2	0.41	31
Calefactor	121.6	12.58	1531	121.2	12.5	1527
Monitor	130	0.39	31.3	128.9	0.37	31.1
Laptop	130.3	0.34	23.6	129	0.32	23.5
Frigobar	129	1.3	167.7	128.7	1.29	165
Plancha	128	9.3	1190	128.7	9.27	1194

La Tabla 1 presenta los resultados del sistema teniendo en cuenta mediciones que se realizaron a diferentes electrodomésticos y aparatos electrónicos conectados al dispositivo de medición. Se observa que los valores varían para los diferentes electrodomésticos, pero el valor es muy cercano a lo que presenta un instrumento de medición comercial. La finalidad de este artículo no es presentar un sistema de medición con un error bajo, sino el desarrollo de un sistema inalámbrico que presente los datos de consumo de energía eléctrica de una casa solar.

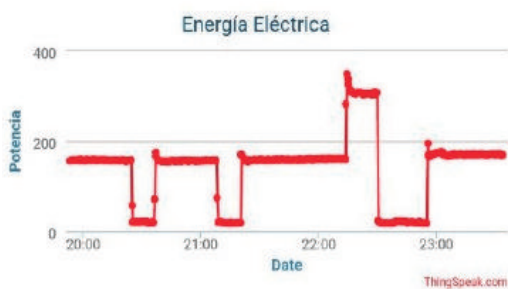


Figura 8. Gráfica de potencia de un refrigerador

La gráfica muestra el consumo de un refrigerador convencional en operación normal y se observan las variaciones de consumo respecto al tiempo, las cuales son causadas por el encendido y apagado del compresor y de los ventiladores que realizan el tiro forzado dentro del congelador y del compartimento principal. A pesar de que el consumo de este dispositivo es casi lineal dado que es un dispositivo que está en funcionamiento día y noche, presenta variaciones dependiendo del uso que le dé el usuario y sus hábitos personales. También tiene un comportamiento repetitivo durante la noche que es cuando se mantiene por más tiempo cerrado.

También tenemos la gráfica del comportamiento de la potencia de un refrigerador en estado que se ha mantenido cerrado durante un tiempo y tiene un comportamiento periódico. La Figura 9 exhibe la señal cuadrada casi periódica que se tiene como resultado del consumo de un refrigerador que se ha mantenido en un estado de reposo durante un tiempo. Lo anterior representaría un comportamiento normal si el usuario no abriera la puerta del

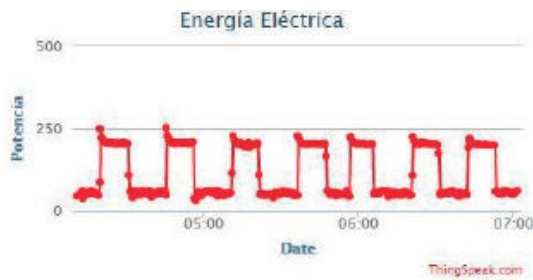


Figura 9. Gráfica de potencia de un refrigerador.

refrigerador, cuestión que es imposible ya que es un sistema diseñado para guardar alimentos y bebidas las cuales son requeridas a cualquier hora del día.

Tomando en cuenta las diferentes gráficas de comportamiento se tiene que en la mayoría de los casos el consumo está determinado por los hábitos del usuario. Por lo tanto, cuando se observa la diferencia del consumo en un aparato se puede concluir que el uso que se le da determinará su consumo eléctrico. Por los resultados, se puede cambiar el comportamiento o el patrón de uso del dispositivo al considerar que el consumo del dispositivo baja y que el sistema de monitoreo presenta información útil para tomar consciencia del consumo de energía.

CONCLUSIONES

Los sistemas de monitoreo del consumo de energía eléctrica son muy útiles desde los más básicos hasta los más completos, ya que los primeros sólo presentan el consumo general de la casa, sin embargo, el tener un sistema que muestre el consumo de cada uno de los aparatos ayuda a saber cuál es su comportamiento dependiendo del patrón de uso. También tiene como resultado el generar acciones que modifiquen ese patrón de uso y que el usuario sea consciente de lo que representa el aumento o disminución en el consumo, es decir, el cambio de un hábito.

También es importante mencionar que un sistema de este tipo se puede conectar a un sistema de predicción y control del consumo eléctrico. Al considerar el trabajo de Suryaderava et al. [10] se observa que se pueden controlar los dispositivos para así limitar el consumo. En este caso el sistema se implementará dentro de un sistema de predicción y control de consumo, dado que las casas eléctricamente aisladas presentan un problema con la dependencia de la carga en sus baterías. Al depender el sistema de la cantidad de energía generada y la cantidad de energía utilizada, es conveniente tener un monitoreo del consumo y generación de la energía. Como trabajo futuro se planea utilizar el sistema para proveer los datos a un sistema de predicción del consumo de energía eléctrica, por medio de redes neuronales y el principio de las máquinas de soporte de vectores. Estos métodos han sido utilizados para la predicción del consumo, así como algunos otros métodos híbridos teniendo como base las redes neuronales. También se podrá controlar el consumo por medio de la conexión y desconexión de cargas para así alcanzar el objetivo de tener una vivienda eléctricamente sustentable al contar con su sistema de generación y distribución conectado al sistema de monitoreo, predicción y control de consumo.

REFERENCIAS

- [1] M.-F., Ramos-Gutiérrez, "La generación de energía eléctrica en México," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, no. 4, pp. 197-211, 2012.
- [2] W. Van Heddeghem, S. Lambert, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet y P. Demeester, "Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012." *Computer Communications*, vol. 50, pp. 64-76, 2014.
- [3] M. Toledano-Ayala et al., "Water, gas and electric power monitoring system for residential developments: A technological approach,"



Building Services Engineering Research and Technology, vol. 32, pp. 183-197, 2011.

[4] T. L. Webb, Y. Benn, y B. P. I. Chang, "Antecedents and consequences of monitoring domestic electricity consumption," *Journal of Environmental Psychology*, vol. 40, pp. 228-238, 2014.

[5] A. S. Ahmad et al., "A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 102-109, 2014.

[6] F. Kaytez, M. C. Taplamacioglu, E. Cam y F. Hardalac, "Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 67, no. August, pp. 431-438, 2015.

[7] K. Li, C. Hu, G. Liu y W. Xue, "Building's electricity consumption prediction using optimized artificial neural networks and principal component analysis," *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 106-113, 2015.

[8] S. Kouhi, F. Keynia, y S. Najafi , "A new short-term load forecast method based on neuro-evolutionary algorithm and chaotic feature selection," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 862-867, 2014.

[9] F. Zhang, C. Deb, S. E. Lee, J. Yang, y K. W. Shah, "Time series forecasting for building energy consumption using weighted Support Vector Regression with differential evolution optimization technique," *Energy and Buildings*, vol. 126, pp. 94-103, 2016.

[10] N. K. Suryadevara, S. C. Mukhopadhyay, S. D. T. Kelly y S. P. S. Gill, "WSN-based smart sensors and actuator for power management in intelligent buildings," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 564-571, 2015.