

# MEDICIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

***Luis J. Ricalde Castellanos***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

***Emmanuel de la Cruz May***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

***Eduardo E. Ordoñez López***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

***Braulio J. Cruz Jiménez***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

## Resumen

En el presente trabajo se presenta el diseño de un sistema de gestión de energía, en donde se emplea una tarjeta de medición de potencia, la cual fue elaborada y caracterizada para su implementación en una red eléctrica inteligente. El dispositivo fue elaborado con el propósito de crear una tarjeta de medición de potencia de bajo costo para el monitoreo de la generación de fuentes de energías renovables como son sistemas eólicos y fotovoltaicos. El desarrollo de este dispositivo tiene la finalidad de procesar las mediciones de generación realizadas y de la demanda energética para ser empleadas en un sistema de gestión energética que pueda tomar decisiones de cuales cargas en el edificio puedan ser alimentadas.

Los resultados obtenidos indican que esta tarjeta es una buena alternativa para realizar la gestión y el monitoreo de los sistemas de generación de energías renovables.

**Palabra(s) Clave(s):** Gestión energética, medición de potencia, red eléctrica inteligente, sistema fotovoltaico, sistema eólico.

## 1. Introducción

En la actualidad se vive una crisis de energía debido a que las reservas de los combustibles derivados del carbón se están agotando, encareciéndose su explotación y consumo. Al generar energía con este tipo de combustible se emiten gases de efecto invernadero, causantes del: calentamiento global, la alteración del clima y el hábitat [7].

Los costos de producción y almacenamiento de diversas fuentes de energía renovables de baja capacidad han disminuido considerablemente, en la actualidad se trabaja a nivel mundial en su integración a las redes eléctricas públicas. Los primeros pasos en la integración de fuentes de energía renovable se dieron con la implementación de sistemas híbridos fotovoltaico-eólicos como fuentes complementarias para aplicaciones rurales y conexiones débiles a la red. Actualmente se realiza investigación en la integración de diversas fuentes de energía de pequeña escala tales como solar térmica, biomasa, celdas de combustible y mareomotriz, bajo nuevos y avanzados esquemas de control constituyendo lo que se denomina una red eléctrica inteligente o *smart grid*. Dado que los costos de producción de las aplicaciones fotovoltaicas y eólicas se han reducido considerablemente se han convertido en la elección primaria de generación de energía en las redes eléctricas inteligentes [3].

Una red inteligente es aquella que puede integrar de manera eficiente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella, de tal forma que se asegure un sistema energético sostenible y eficiente, con bajas pérdidas y altos niveles de calidad y seguridad de suministro.

La humanidad ha experimentado en el último siglo un desarrollo inmenso sustentado en el consumo energético basado en el aprovechamiento de fuentes

de energía de origen fósil. Estas energías han sido explotadas suponiendo una disponibilidad ilimitada, y sin valorar en ningún momento los costes ambientales ocasionados [1].

Basados en la forma de consumir combustibles fósiles, el ser humano se ha enfocado hasta la actualidad, en un modelo energético en el cual se sigue una rigurosa cadena que se lleva a cabo en el siguiente orden: generación, distribución, transporte y consumo.

Sin embargo, el cambio de este modelo es más que una necesidad hoy en día, tendiendo el nuevo modelo a la diversificación de las fuentes de energía, un mayor aprovechamiento de las energías renovables y la eficiencia y el ahorro energético.

El nuevo modelo energético pretende transformar el sistema actual en un sistema distribuido, en el cuál cualquier agente que esté conectado a la red tiene la posibilidad de aportar energía, posibilitando la creación de microgeneradores, de forma que no exista una dependencia tan directa como con la generación energética actual [8].

Gracias a las redes inteligentes es posible disminuir drásticamente las pérdidas por el transporte energético, facilitar la conexión a la red de todo tipo de energías renovables (facilitando la integración de energías como la eólica y solar), soportar las capacidades de almacenamiento energético y la conexión de vehículos eléctricos o híbridos.

A pesar de que no existe una definición general estándar de una red eléctrica inteligente, la Plataforma Tecnológica Europea de *Smart Grids* (*Smart Grids: European Technology Platform*) define una red eléctrica inteligente como “Una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de todos los usuario conectados a ella, generadores, consumidores y aquellos que realizan ambas acciones, con la finalidad de distribuir de forma segura y eficiente el suministro eléctrico, desde el punto de vista sostenible y económico” [6].

## **2. Desarrollo**

### **Energía eólica**

La energía eólica es una de las energías abundantes y renovables de la naturaleza. Proviene de la conversión de la energía cinética que traen las masas de aire en movimiento hacia energía mecánica y luego a energía eléctrica. Para conseguir esta conversión se utilizan máquinas llamadas aerogeneradores. Estos dispositivos, a través de una superficie aerodinámica expuesta al viento, producen trabajo mecánico en un eje.

Para llevar adelante estas transformaciones se utilizan distintos tipos de máquinas. Generalmente no se requieren grandes velocidades de viento para producir energía. En la mayoría de los casos los equipos están diseñados para comenzar a generar energía con velocidades del viento de unos 15 km/h. y entregan su potencia máxima a una velocidad del orden de los 40 a 55 km/h.

Para sistemas conectados a la red, los componentes de balance del sistema incluirán un controlador, baterías de almacenamiento, una unidad rectificadora de señal (inversor) y el cableado. En caso de sistemas que no están conectados a la red de suministro, requieren el uso de baterías para almacenar la energía excedente generada, y usarla cuando no exista viento. Asimismo, requieren un controlador de carga para proteger a las baterías de una sobrecarga [2].

### **Energía solar**

La energía solar es la energía producida por el Sol y que es convertida a energía útil por el ser humano. El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el ser humano ha utilizado a lo largo de la historia.

La radiación del Sol que llega a la atmósfera de la Tierra disminuye por diversos elementos, como son, la absorción de la radiación, los gases en la atmósfera, como dióxido de carbono, ozono, y otros gases más, por el vapor de agua, por las partículas de polvo, moléculas y gotas de agua, por reflexión de las nubes y por la inclinación en la que se recibe la radiación.

Las principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red son: el arreglo fotovoltaico, que es el elemento encargado de transformar la luz del sol

en electricidad; y un elemento acondicionador de la potencia producida (un inversor CD/CA), cuya función es adecuar la energía generada por el arreglo a las características eléctricas de la red para su conexión a ésta.

Un arreglo fotovoltaico está constituido por un determinado número de módulos o unidades fotovoltaicas individuales. El número de unidades depende de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. El voltaje de salida del arreglo, que corresponde al voltaje de operación del inversor se obtiene mediante la conexión serie de un número determinado de módulos; y la potencia, a través de la conexión en paralelo de dichas series [5].

### **Sistema de gestión de energía**

Un sistema de gestión energética (SGE) puede definirse como una metodología para lograr la mejora sostenida y continua del desempeño energético. La implementación de un SGE no debe entenderse como un objetivo por sí mismo, es decir, lo realmente importante son los resultados de todo el sistema. Entendida de este modo, la efectividad de un SGE dependerá, en gran medida, del compromiso y disponibilidad de todos los actores involucrados para gestionar el uso y el costo de la energía [4].

Los SGE persiguen la mejora continua en el empleo de la energía mediante un uso más eficiente de la misma, reduciendo su consumo, los costes financieros asociados y las emisiones de gases de efecto invernadero, así como mediante el mejor aprovechamiento de las energías renovables.

Un SGE aporta los beneficios siguientes:

- Ayuda a identificar, priorizar y seleccionar las acciones para la mejora del desempeño energético, con base en su potencial de ahorro y el nivel de inversión requerido.
- Reduce costos al aprovechar al máximo los recursos energéticos.
- Impulsa la productividad y el crecimiento (mayor aprovechamiento, menor desperdicio).
- Promueve las mejores prácticas de gestión energética.

- Asegura la confianza y calidad de la información que se utiliza para la toma de decisiones.
- Facilita la integración de sistemas de gestión ya existentes.
- Transformación entrada-salida. El proceso de aprendizaje de la red, consiste en presentarle un ejemplo y modificar sus pesos sinápticos de acuerdo con la respuesta deseada. Aprende, por lo tanto, una transformación entrada-salida.
- Adaptabilidad. La red tiene la posibilidad de adaptar sus pesos sinápticos a los cambios en su medio ambiente, es capaz de cambiar dinámicamente.
- Tolerancia a fallas. Debido a la interconexión paralela, la falla de un procesador no impide que la red continúe presentando un buen comportamiento.

### **Tarjeta de medición de potencia**

Una tarjeta de medición de potencia, permite la medición de variables de corriente y de voltaje, es decir que con éste dispositivo podemos reemplazar el uso de vóltmetros y ampérmetros, adicionando la capacidad de medir energía e incorporando beneficios adicionales como la comunicación por medio de protocolos ZigBee, con los que podemos integrar estos equipos a un software para realizar gestión de energía implementando un sistema de monitoreo.

Un sistema de monitoreo de indicadores energéticos es aquel capaz de registrar variables eléctricas de interés que en determinado momento proporcionen información para establecer el comportamiento de un sistema de potencia. Es importante contar con este sistema en donde se midan en tiempo real las variables de los equipos y sistemas a fin de vigilar su desempeño energético y operativo.

La tarjeta de medición propuesta cuenta con dos transductores de voltaje y cuatro transductores de corriente, los cuales convierten las variables energéticas de entrada en otras variables de salida de valores muy pequeños. Los datos resultantes pasan a través de unos filtros pasa bajos de orden 6, diseñados para acondicionar la señal y finalmente dirigirlos a las entradas analógicas de un

“Arduino DUE”. Se conecta un módulo Xbee para llevar a cabo una comunicación con el ordenador y obtener los datos de medición en tiempo real.

Los Xbee son dispositivos inalámbricos fabricados por Digi International, tienen su propio protocolo de comunicación por radio frecuencia, son robustos, de bajo costo, bajo consumo y tienen un alcance en sus distintos modelos entre 100 metros y los 10 kilómetros. Los dispositivos Xbee utilizan el protocolo IEEE 802.15.4 mejor conocido como ZigBee, estos fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible.

En la figura 1, se muestran los principales componentes del sistema de generación eólica instalado en la Facultad de Ingeniería de la UADY. La energía proveniente de las turbinas pasa a través del tablero de control, donde se verifica que se encuentre dentro de los rangos de operación permitidos, de lo contrario la turbina se protege apagando todo el sistema. Posteriormente, la energía producida se dirige a los rectificadores que cuentan con resistores de regulación. Los resistores entran en funcionamiento cuando existe excedente de energía. De la energía resultante al pasar por los rectificadores, se generan dos corrientes y un mismo voltaje para cada par de rectificadores. En esta etapa del proceso de generación del sistema eólico es donde se toma la medición de los voltajes y corrientes para el dispositivo propuesto.

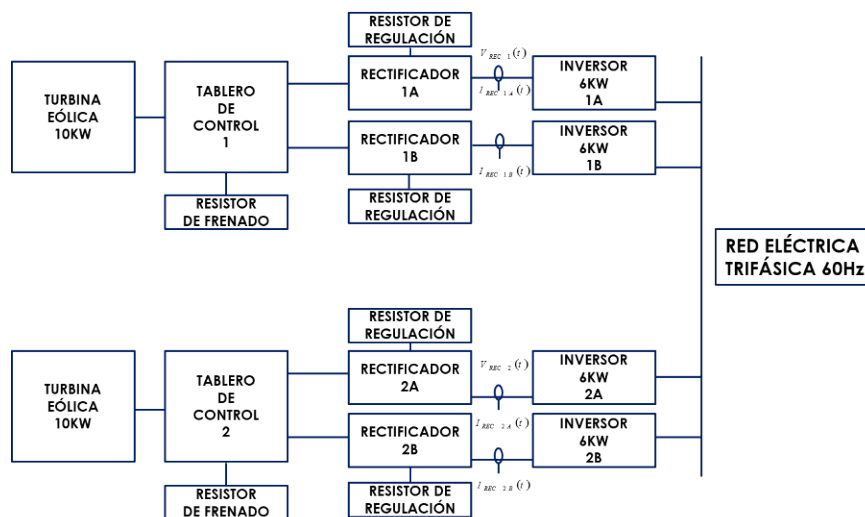


Figura 1 Esquema de medición de potencia en sistemas eólicos.

En la figura 2, se observa que las corrientes y voltajes adquiridos pasan a través de los transductores de voltaje y corriente respectivamente. La transformación resultante pasa a través de unos filtros pasa bajos de orden 6 para el acondicionamiento de la señal que entra por los puertos analógicos de un Arduino DUE para posteriormente transmitir la información mediante un módulo Xbee a un ordenador.

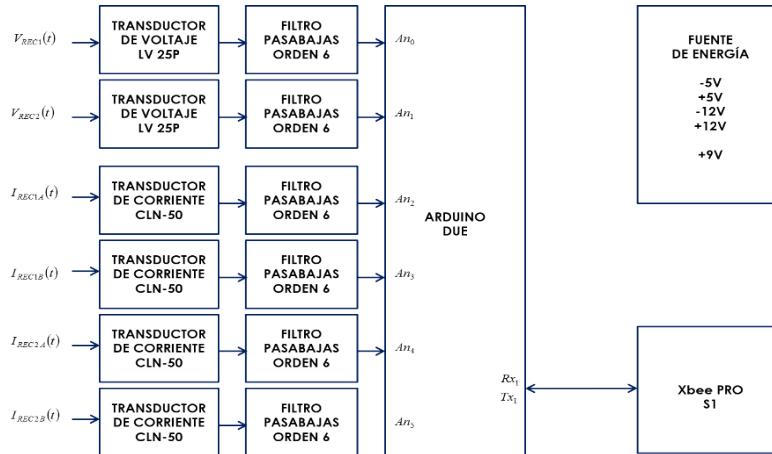


Figura 2 Procesamiento de las variables de medición.

Se cuenta con fuentes de alimentación variadas,  $\pm 5$  V para la alimentación de los filtros pasa bajos,  $\pm 12$  V para la alimentación de los transductores y +9 V para el Arduino DUE. Entre sus características de corriente y voltaje, la tarjeta de medición de potencia soporta hasta 440 V y un máximo de 50 A.

Se realizó del diseño del circuito en el software Altium Designer, donde se verificó que los componentes se encontraran distribuidos de uniformemente, y que existiera suficiente espaciado entre los mismos como se muestra en la figura 3. Posteriormente se obtuvieron las coordenadas para la elaboración de la tarjeta en la máquina CNC de circuitos impresos, obteniendo como resultado la tarjeta mostrada en la figura 4.

### Potencia activa (P)

Es aquella que se aprovecha como potencia útil. También se llama potencia media, real o verdadera y se debe a los dispositivos resistivos. Su unidad de medida en el watt (W).



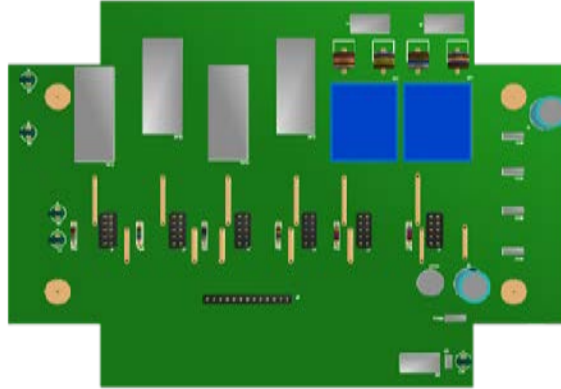


Figura 3 Diagrama en 3D de la tarjeta de medición de potencia.

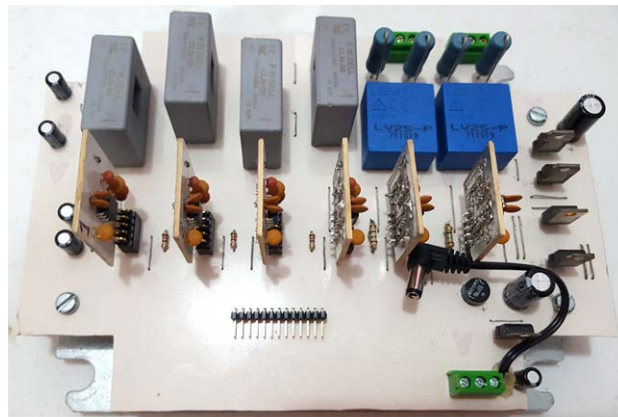


Figura 4 Tarjeta de medición de potencia.

### **Potencia reactiva (Q)**

Es la potencia que necesitan las bobinas y los condensadores para generar campos magnéticos o eléctricos, pero que no se transforma en trabajo efectivo, sino que fluctúa por la red entre el generador y los receptores. Su unidad de medida es el voltamperio reactivo (VAR).

### **Potencia aparente(S)**

Es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad. Se obtiene como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva y representa la ocupación total de las instalaciones debida a la conexión del receptor. Su unidad de medida es el voltamperio (VA).

### 3. Resultados

En la figura 5, se muestra la caracterización de los filtros pasa bajos de acondicionamiento de señales que se elaboraron para la tarjeta de medición de potencia. Se graficó el comportamiento de cada uno de los filtros, variando la frecuencia de 0 hasta 2000 hertz. Se observa que la banda de transición empieza alrededor de los 800 hertz y termina en los 1200 hertz. La frecuencia de corte 800 hertz equivale a la 13a. armónica de 60 hertz, ya que únicamente se utilizaron ondas senoidales para realizar la caracterización de los filtros.

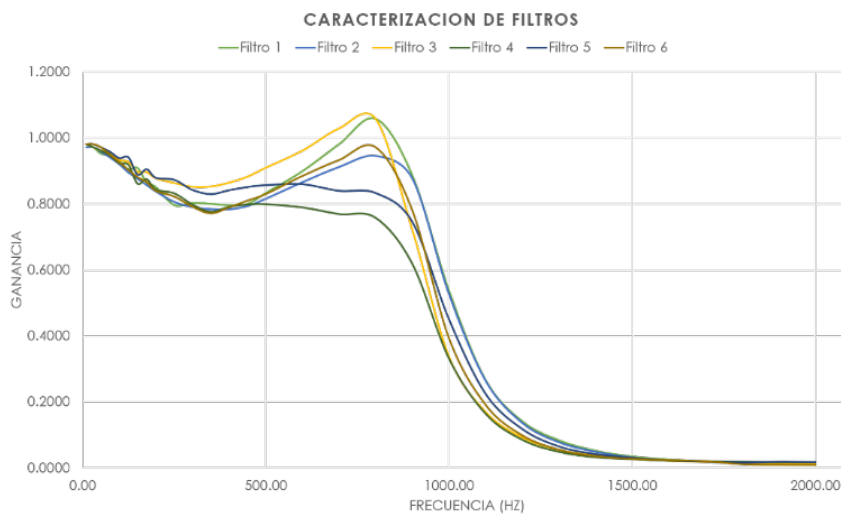


Figura 5 Gráfica de caracterización de filtros pasa bajos.

A pesar de las variaciones que se observan en la respuesta de magnitud en el rango de [0.8 a 1.00], la fidelidad de los filtros es completa ya que los filtros empleados no interrumpen con la señal de muestreo del sistema. Estas no afectan a las señales que se procesan en el Arduino DUE, debido a que el rango de frecuencia de las señales con las que se trabajó está comprendido entre 0 y 10 hertz siendo la señal muy constante y con oscilaciones mínimas.

La comprobación de los 4 transductores de corriente se llevó a cabo en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UADY, donde se verificó el funcionamiento de cada uno de los sensores de corriente de la tarjeta. En esta prueba se varió la corriente que circulaba a través del sistema desde 0 hasta 20

Amperes. Como se muestra en la figura 6, el comportamiento de los transductores es lineal con algunas variaciones, mismas que se corregirán en la programación del Arduino DUE. Así mismo se conectó la tarjeta a la corriente alterna con 180 V pico, empleando un rectificador de media onda, obteniendo en ambos transductores de voltaje una medición de 1.40 V pico.

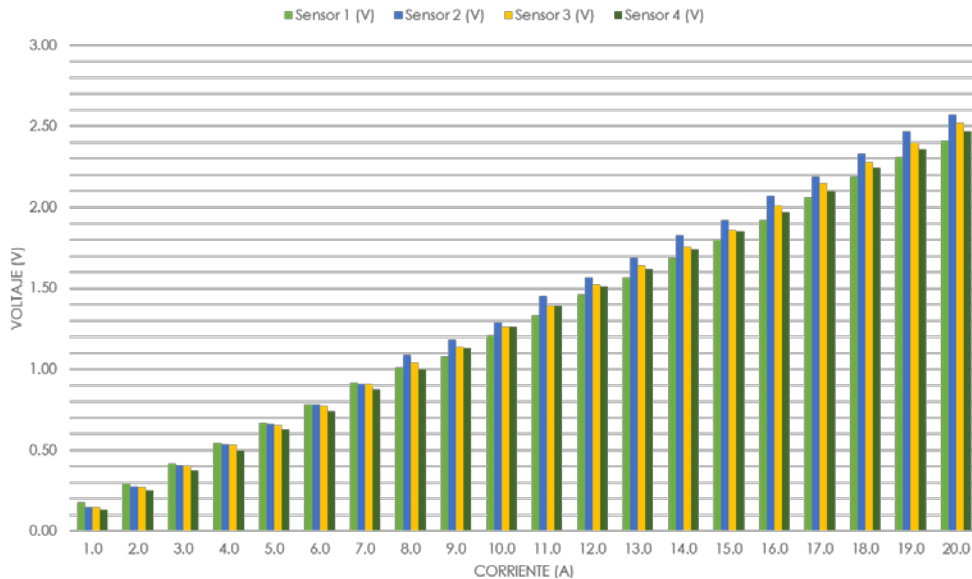


Figura 6 Medición de los sensores de corriente.

Como se puede apreciar en la figura 7 y figura 8, el analizador de energía de Fluke es más preciso al lograr detectar pequeños cambios en la generación de energía del sistema. Sin embargo, la tarjeta de medición de potencia presentada de acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente, se asemeja al comportamiento que nos muestra el analizador de calidad de potencia Fluke. Cabe destacar que se calibró mediante software la tarjeta de medición propuesta.

#### 4. Discusión

Algunas compañías del mercado han desarrollado nuevos sistemas para la medición de energía que ponen al alcance de los usuarios industriales prestaciones de calidad de energía y análisis que eran exclusivos de los medidores de gama avanzada. Estos medidores permiten recopilar, almacenar y analizar información de los sistemas, adaptándose a las necesidades de hoy y

del futuro, ayudando a todo aquel usuario industrial que busque conocimiento total de su consumo y que requiera alta confiabilidad y disponibilidad en la red eléctrica.

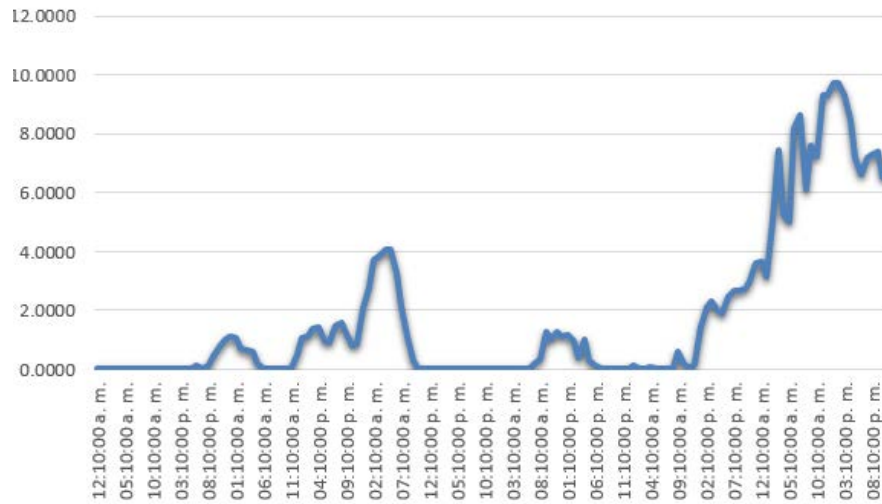


Figura 7 Gráfica de generación de una turbina empleando la tarjeta de medición.

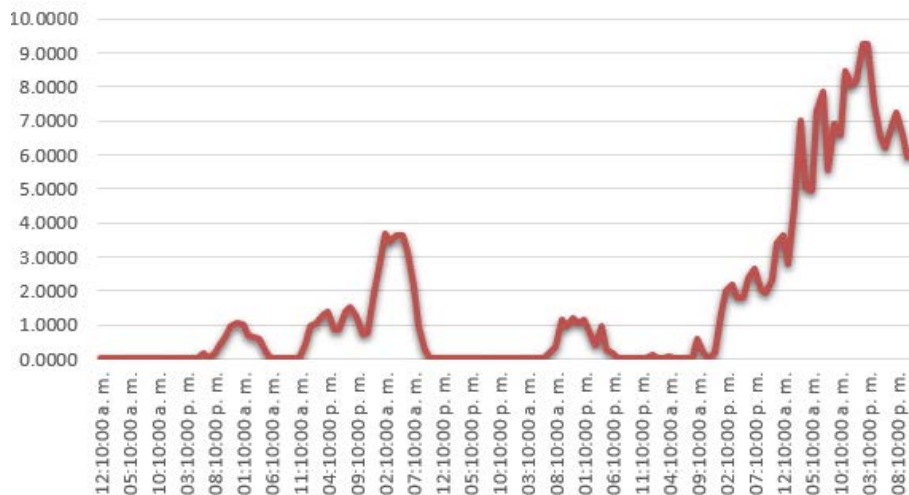


Figura 8 Gráfica de generación de una turbina empleando el analizador FLUKE.

Los analizadores de calidad de potencia Fluke son una opción para implementar sistemas de gestión de energía, estos permiten localizar, predecir, evitar y solucionar problemas en los sistemas de distribución de alimentación e incluyen numerosas características para capturar detalles que permiten detectar problemas rápidamente y de manera segura. La solución de problemas es rápida

gracias a la visualización en display de tendencias y sucesos capturados, mientras la grabación de fondo continúa.

Los sistemas Fluke cuentan con la herramienta de localización de averías completa en tres fases: mide la tensión, la corriente, la frecuencia, la potencia, la fluctuación, la armonía, y el consumo de potencia (energía). La desventaja de emplear estos sistemas para la gestión energética como monitoreo de la producción de energía de fuentes renovables es debido al elevado costo de los equipos, el riesgo que implica dejar el equipo en cuartos de control por tiempo indefinido, donde podría presentar alguna avería del equipo. Otra de las desventajas que presenta es en la obtención de datos, ya que se requiere extraerlos de forma manual, por otro lado la tarjeta que se elaboró es ideal para el monitoreo en tiempo real de generación de energía, debido a la transmisión de datos vía inalámbricamente, con esta característica la tarjeta sólo necesita ser instalada en el lugar que se desee tomar mediciones, sin la necesidad de extraer manualmente los datos, además el costo de elaboración de la misma es mucho menor al de los equipos Fluke y otros sistemas.

## **5. Conclusiones**

En los últimos años ha crecido de manera importante la creación de conciencia acerca de las ventajas del ahorro energético y la búsqueda por implementar sistemas de administración de energía.

La importancia de contar con un sistema permanente de medición, es que lleva a los usuarios tarde o temprano a lograr mejoras en el sistema eléctrico y a la obtención de ahorros de energía sustentados en una base real de comparación, así como en una verdadera administración del flujo energético.

Los resultados de este trabajo podrán extenderse para el monitoreo de generación de energía de diferentes tipos de fuentes renovables contando con datos en tiempo real para posteriormente implementarse en un sistema de gestión de micro redes empleando redes neuronales artificiales, tomando decisiones de donde tomar la energía demandada de acuerdo a los datos de generación obtenidos, y costos de generación de las distintas fuentes.

Cabe resaltar que cada vez, adquiere mayor importancia el conocer la eficiencia de una red eléctrica, lo que se convierte en herramienta fundamental para reducir el impacto tanto económico como ambiental.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Carta, Calero, Colmenar, Castro, Centrales de Energía Renovables. 2009. Pearson.
- [2] Y. Hidaka, K. Kawahara, Modeling of a hybrid system of photovoltaic and fuel cell for operational strategy in residential use. 2012. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). London. Pp. 1-6.
- [3] M. Gamez, "Optimal operation via a recurrent neural network". The 2011 International Joint Conference on Neural. Vol. 9. Num. 3. 2011. Pp. 945-953.
- [4] M. Osswald, Integrated Fuel Cell & Electrolyzer System for energy harvesting, storage and supply, Telecommunications Energy Conference 'Smart Power and Efficiency' (INTELEC). Proceedings of 2013 35th International. Pp. 1-5.
- [5] R. M Oviedo, Z. Fan, M. Sooriyabandara, Ecoisland: A hydrogen refueler and storage system with renewable energy sources. T&D Conference and Exposition, 2014.
- [6] L. J. Ricalde, Inverse Optimal Adaptive Recurrent Neural Control with Constrained Inputs, Tesis de doctorado. 2005. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Guadalajara, México.
- [7] L. J. Ricalde, E. Ordoñez, M. Gamez y E. Sanchez, "Design of a Grid Management System with Renewable Energy Generation". IEEE Symposium Series on Computational Intelligence Applications in Smart Grid. 2011. Pp. 1-4.
- [8] J. Wang, "Analysis and design of a recurrent neural network for linear programming". IEEE Trans Circuits. Vol. 40. Num. 9. September 1993. Pp. 613-618.

## **7. Autores**

Ing. Emmanuel de la Cruz May, obtuvo el título de Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad del Valle de México, Campus Mérida en 2013. Actualmente está finalizando sus estudios de posgrado en Energías Renovables en la Facultad de Ingeniería de la UADY. Sus áreas de interés son la instrumentación electrónica y las redes eléctricas inteligentes.

M.I. Eduardo E. Ordoñez López es Maestro en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente se desempeña como profesor titular de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán en donde coordina el programa educativo de la Licenciatura en Energías Renovables. Realiza investigaciones en los campos de la energía eólica, gestión energética y naturación en edificios.

Dr. Luis J. Ricalde Castellanos recibió el título de Ingeniero Mecánico del Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán, México en 1999, la Maestría en Control Automático y el doctorado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV-IPN (Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional), Guadalajara, México, en 2001 y 2005. Desde 2007, ha estado con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) como profesor investigador del programa de posgrado en Ingeniería opción Energías Renovables. Su interés de investigación es el control neuronal no lineal, las redes eléctricas inteligentes, sistemas de generación de energía fotovoltaica y eólica. Se le concedió el Premio del Arturo Rosenblueth en 2005 y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México (SNI-1).

C. Braulio Cruz Jiménez obtuvo su grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Automatización por el Tecnológico de Monterrey, su área de investigación son los sistemas de control y procesamiento de señales. Desde 2005, ha estado con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) como Coordinador del programa de Licenciatura en Ingeniería en Mecatrónica.