

SOFTWARE PARA EL MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN TIEMPO REAL

Ms. C. Ramón de Jesús López Suárez¹, Ing. Renier Fagundo Mesa¹

1. Universidad de Matanzas, ramon.suarez@umcc.cu

Resumen

Este trabajo se propuso elaborar un sistema para la medición del consumo de energía eléctrica en tiempo real, que permita medir, registrar, visualizar y analizar su comportamiento, así como determinar su costo. Se utilizó un Arduino Nano para acoplar un transformador de corriente HWCT004. Se desarrolló un programa con el empleo de *Programming/Wiring* para el Arduino y C# para producir una aplicación de escritorio para Windows. Se obtuvo un sistema que permite monitorear el consumo de energía eléctrica y luego analizar tales mediciones para valorar el comportamiento del proceso en cada instante de tiempo medido. La validación del sistema en los casos estudiados demostró que erradica los errores e imprecisiones provocadas por las mediciones manuales, facilita que se obtengan recomendaciones apropiadas para la optimización y el ahorro de energía eléctrica, emite el gasto del proceso medido y contribuye a su sostenibilidad.

Palabras claves: *Revolución industrial 4.0; automatización; control; IoT; sostenibilidad.*

Introducción

Existe un amplio consenso entre especialistas y expertos acerca de que el conjunto de tecnologías que se conoce como Internet de las Cosas (*IoT* por sus siglas en inglés), va a producir un enorme impacto en la sociedad, transformando la vida cotidiana, el mundo laboral, los negocios y prácticamente todos los ámbitos de la sociedad (Cruz Vega et al., 2015). Este trabajo es un paso en ese sentido.

La energía eléctrica desde su descubrimiento e implementación jugó un papel fundamental en el desarrollo de la humanidad, debido a su gran versatilidad y posibilidad de control, a la inmediatez en su utilización y a la limpieza en el punto de consumo. En la vida diaria de las personas se emplea para proporcionar toda clase de servicios, desde los más básicos hasta los asociados al ocio y a un sin fin de comodidades (luz, refrigeración de alimentos, climatización, radio, televisión, ordenadores, entre otros). También el uso de la electricidad está igualmente extendido en los ámbitos comercial e industrial: alumbrado, climatización, motores eléctricos con multitud de aplicaciones de industria, con una utilización específica o intensiva. Es muy difícil reemplazarla en la mayoría de sus usos y aplicaciones, por lo que puede afirmarse que la calidad de vida y el propio funcionamiento de la sociedad depende de forma significativa de la disponibilidad de energía eléctrica (Abur et al., 2002).

En el caso de Cuba, no puede olvidarse que cualquier análisis de la economía cubana pasa por la realidad del bloqueo imperialista, que funciona como una barrera adicional al desarrollo (adicional a las barreras económicas que los países ricos construyen contra el desarrollo de todos los países del sur). El bloqueo funciona como un elemento de disuasión o riesgo en casi todas las negociaciones. Solamente se puede perforar con importantes innovaciones; no con pequeñas mejoras de productos, las cuales pueden tener cierta importancia después (Lage Dávila, 2007).

Los principales consumidores de energía eléctrica en Cuba se concentran en el sector doméstico con 36,3 %, seguido por la industria con 25,4 % y en menores proporciones, el comercio, la agricultura, el transporte y la construcción, con alrededor del 5,3 %, el resto son consumidores misceláneos con el 18,7 % (Suárez Rodríguez et al., 2011).

Es imprescindible el ahorro de energía eléctrica debido a que en el país se utiliza para producir electricidad, principalmente, combustible importado. El petróleo que se extrae de los pozos disponibles en el territorio nacional, presenta un alto contenido de azufre, motivo por el cual no se puede quemar directamente en las termoeléctricas. Por ello es necesario importar combustible desde el exterior y rentar barcos que lo transporten, luego se almacena y se transporta hasta las termoeléctricas; incluso, antes de producir energía ya representa un costo elevado (Núñez Barreto, 2020).

Para obtener este conocimiento del comportamiento, no solo de la evolución del consumo eléctrico, sino también de cualquier otro tipo de variable energética, se requiere de un sistema de supervisión básico que permita medir, registrar, visualizar y analizar estas variables (Pérez Barreto, 2019). Además de que reducir tiempo y aumentar el grado de confiabilidad hace que el factor tecnológico y el recurso información, tomen otro valor más significativo para las empresas o instituciones.

Desarrollo

Trabajos anteriores diseñaron e implementaron proyectos con propósitos similares (Acosta et al., 2017) los que desarrollaron un sistema de monitoreo de consumo eléctrico inalámbrico y analizador de la calidad de la energía. En este proyecto se desarrolló un sistema de monitoreo eléctrico para instalaciones que usan electricidad monofásica, el mismo se compone de dos partes fundamentales: la primera parte se enfoca en la medición de las variables eléctricas y hace uso de sensores a través de la placa controladora Arduino y la segunda parte consta de la interfaz de usuario con la cual se graban los datos y se analizan de manera eficiente las variables eléctricas. Para ello utilizan los softwares LabVIEW y el recibo de consumo eléctrico se genera mediante una aplicación *Visual Basic for Applications* (VBA, por sus siglas en inglés) en *Microsoft Excel*, también la información recopilada del programa se almacena y clasifica dentro de una plantilla del paquete computacional *Microsoft Access 2016*, todos son software propietario y en la manera que se conciben hacen compleja y específica su aplicación, también emite un recibo que no se adapta a los objetivos que se persiguen, lo que hace que la solución dada no sea la adecuada tanto por su costo, por no adecuada, así como, por las condiciones del bloqueo de los Estados Unidos contra Cuba que impide el uso de tecnologías propietarias dependientes de empresas americanas.

Según Martin (2018), este desarrolló una investigación de cómo utilizar la arquitectura de software SIEM para el monitoreo en línea del consumo de energía eléctrica en un ambiente residencial y optimizar el mismo. Si bien esta es una solución que permite generar interfaces web en las que se despliegan los cambios del consumo y las variables energéticas en tiempo real, y se logró implementar un prototipo funcional que permite mediante una arquitectura segura, interoperable, escalable y sostenible, optimizar el consumo energía eléctrica, esta solución depende de una conexión libre a internet y hace uso de plataformas para desarrollo de *IoT (Internet of Things)* a las que el país no tiene acceso, como es el caso de *Particle Cloud*. También no se adecuaba en su totalidad a los objetivos de este sistema.

Ruiz Ariza (2019) desarrolló un sistema de control y monitoreo para sistemas de climatización. Este proyecto se enfoca en los equipos de climatización y permite monitorear de manera efectiva variables energéticas como es el caso de corriente nominal y corriente máxima, así como la potencia consumida y la temperatura. El procesamiento de los datos en este proyecto se realiza a partir de un software externo, en este caso Matlab r2018b, y cuenta con una plataforma online para la visualización de las variables en tiempo real. Este proyecto demuestra la relación que existe entre la temperatura externa y el consumo de energía eléctrica. Como es una solución específica y depende de software propietario, no permite su aplicación en otros procesos.

Según Novillo Vicuña et al. (2018), el problema a resolver es la necesidad de monitorear inalámbricamente y a bajo costo, señales eléctricas de voltaje, para controlar la calidad de la energía y de esta manera evitar problemas económicos, de rendimiento o mal funcionamiento de los equipos electrónicos. El objetivo que se planteó fue diseñar una aplicación móvil mediante la utilización de los dispositivos Arduino Uno y *Wifi Shield*, transformadores de voltaje 110/220V, acondicionador de señal compuesto por un circuito divisor de voltaje - circuito *offset*, y Android Studio para la monitorización inalámbrica de señales eléctricas con voltajes de 110/220V. Este trabajo tiene aspectos muy interesantes pero su objetivo dista del propuesto por la presente investigación.

Otros autores también propusieron sistemas para la medición del consumo eléctrico con el empleo de dispositivos Arduino, pero con objetivos limitados, como es el caso del trabajo cuyo objetivo fue desarrollar una aplicación móvil utilizando la plataforma Arduino y Android Studio para la medición y monitoreo de señales de corriente en un tablero de distribución eléctrica (Rivas Cárdenas, 2017). En este caso no se hace mención explícita al *software* y sus funcionalidades, por lo que no satisface los requerimientos mínimos para su empleo en el proyecto ROFLEXIN/LC.

La tendencia básica en la industria de las pruebas automatizadas es un cambio muy marcado hacia sistemas de pruebas basados en *software*. Por ejemplo, el Departamento de Defensa de los EE.UU. especificó, que en los futuros sistemas ATE (Equipo para Pruebas Automatizadas), deben seguir una estructura modular de hardware y software reconfigurable, llamada instrumentación sintética. Este tipo de instrumentación refleja el claro cambio que deja a un lado el hardware como pieza fundamental del sistema y se centra más en el *software* (Montoro, 2016).

Requisitos del *software*

La Ingeniería de Requisitos se debe estructurar en etapas, cuyas actividades buscan comprender, estructurar y documentar las necesidades que los usuarios desean satisfacer con el producto, y que con posterioridad se traducen en un conjunto de sentencias precisas, no ambiguas, que se utilizan para desarrollar el sistema, conocidas como requisitos del sistema (Pressman, 2010).

Requisitos funcionales

1. Desarrollo del *driver* para instalar en el *hardware*.

- 1.1 Analizar y definir los tipos de sensores.
- 1.2 Definir protocolo de comunicación.
- 1.3 Definir la velocidad de transmisión.
- 1.4 Definir velocidad de muestreo.
- 1.5 Definir cantidad de muestras a tomar.
- 1.6 Establecer conexión y realizar pruebas.

2. Almacenar datos de sensores en tiempo real.

- 2.1 Definir formato de documento.
- 2.2 Establecer comunicación con base de datos.
- 2.3 Realizar pruebas.

4. Graficado de reporte en tiempo real.

- 4.1 Crear y maquetar la vista de monitoreo.
 - 4.2 Comprobar la correcta funcionabilidad de la vista.
 - 4.3 Comprobar que la información sea correcta.
 - 4.4 Graficar valores en tiempo real.
5. Normalizar datos provenientes del *hardware*.
- 5.1 Implementar filtro digital.
 - 5.2 Realizar pruebas.
6. Análisis de mediciones.
- 6.1 Crear y maquetar la vista de Análisis de datos.
 - 6.2 Comprobar la correcta funcionabilidad de la vista.
 - 6.3 Implementar algoritmo de detección de picos.
7. Establecer comunicación con dispositivo de *hardware*.
- 7.1 Definir protocolo de comunicación.
 - 7.2 Sincronizar con el *hardware*.
 - 7.3 Verificar la recepción de datos.
 - 7.4 Implementar algoritmos de recepción.
 - a. Realizar pruebas.

Requisitos no funcionales

Son requerimientos que imponen restricciones en el diseño o implementación de un sistema como estándares de calidad. Son propiedades o cualidades que el producto debe tener. Los siguientes requisitos no funcionales, están orientados a la seguridad, estandarización, y centralización de datos, para asegurar así el rendimiento y calidad del *software* (Lara Sobrino, 2019). Para el desarrollo del sistema se logró definir 29 requisitos, los que se clasifican en requisitos no funcionales (RNF) de confiabilidad, eficiencia, soporte, restricciones de diseño, de interfaz, seguridad, *hardware*, *software* y ayudas.

Tabla 1. Equipo del proyecto

Rol	Miembro
-----	---------

Dueño del producto (<i>Product Owner</i>)	Dr. C. Ramón Quiza Sardiñas
Equipo de desarrollo (<i>Scrum Team</i>)	Ing. Renier Fagundo Mesa
<i>Scrum master</i>	Lic. Ramón de Jesús López Suárez

Materiales y métodos

El acondicionamiento de la señal se realiza al considerar que la corriente a medir es alterna, forma de onda sinusoidal, es decir, tiene hemiciclos negativos y positivos mientras que el Arduino solo puede medir magnitudes de corriente positiva. El otro aspecto es que debe estar en el rango de 0 V a 5 V, por lo que la amplitud máxima no debe exceder este rango. Para lograrlo se implementó un divisor de voltaje para correr el *offset* de 0 V a 2,5 V ($5V/2$) y para ello se emplean dos resistencias iguales con valores de 10K cada una, que forman un divisor de tensión según se aprecia en la Figura 1. Como el HWCT004 no tiene una resistencia de carga incorporada (*burden resistor*) la señal de corriente necesita ser convertida a señal de voltaje y por eso se usa una resistencia de carga (Burden). Los cálculos de los valores de los componentes se basan en los realizados según Energy (2019) donde:

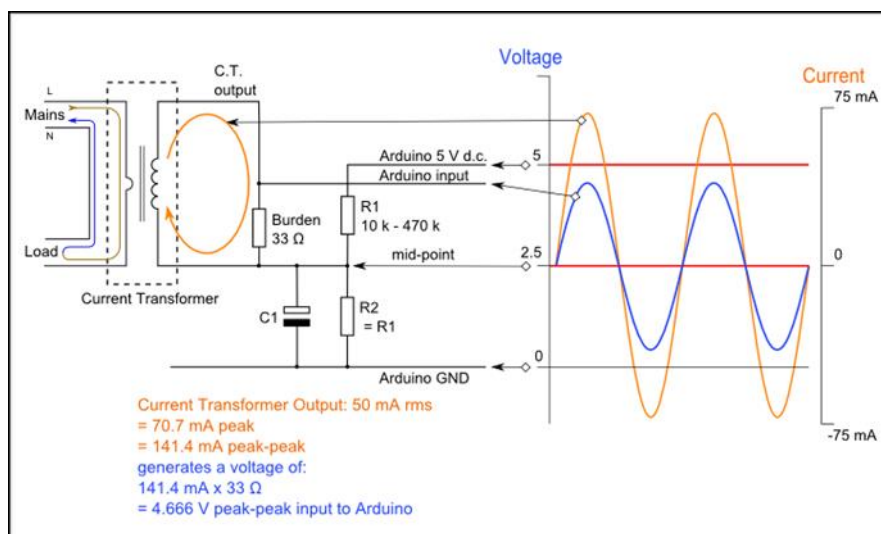


Figura 1. Esquema de la interfaz de adaptación.

Fuente: (Energy, 2019).

Empleo de la raíz media cuadrática (RMS)

En la interfaz principal (Figura 2). se puede observar la gráfica del muestreo en tiempo real de comportamiento del consumo de corriente y de potencia aparente. Estos valores son los valores medios cuadráticos resultados de la aplicación de las ecuaciones en 5 000 muestras por segundo que corresponde al muestreo del sensor por parte del dispositivo de hardware.

$$P_{pc} = \text{RMS_current} * \sqrt{2} = 50 \text{ A} \times 1,414 = 70,71 \text{ A} \quad (1)$$

$$S_{pc} = P_{pc} / \text{no_of_turns} = 70,71 \text{ A} / 1000 = 0,0707 \text{ A} \quad (2)$$

$$I_{br} = (\text{AREF}/2) / S_{pc} = 2,5 \text{ V} / 0,0707 \text{ A} = 35,4 \text{ } \Omega \quad (3)$$

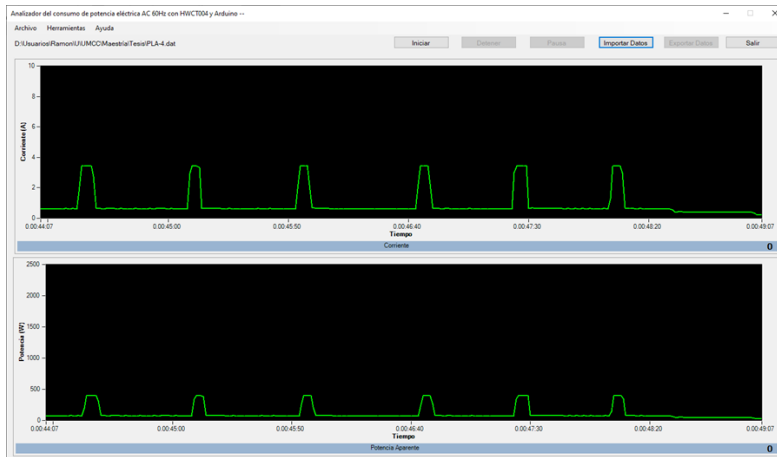


Figura 2. Interfaz principal

Ajuste de la curva mediante el método *spline* cúbico

En el subcampo matemático del análisis numérico, un *spline* es una curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios (Figura 3). Para el ajuste de curvas, los *splines* se utilizan para aproximar formas complicadas. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de los *splines* los hacen populares para la representación de curvas en informática, particularmente en el terreno de los gráficos por ordenador.

Definición: La función $s(x)$ se llama cúbica a trozos en $[x_0, x_n]$ si existen polinomios cúbicos $q_0(x), q_1(x), \dots, q_{n-1}(x)$ tales que:

$$s(x) = q_k(x) \text{ en } [x_k, x_{k+1}], \text{ para } k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (4)$$

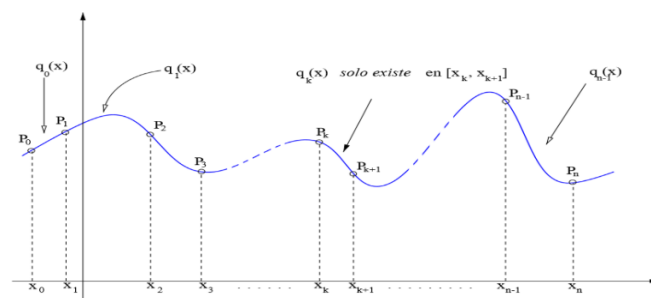


Figura 3. Ejemplo de curva ajustada (Quesada, 2000).

Caso de estudio: Monitoreo y medición del consumo de una impresora 3D durante la impresión de una pieza.

Durante el proceso de impresión de una pieza para analizar posteriormente el consumo de energía eléctrica con el propósito de optimizar parámetros de fabricación se hizo necesario el monitoreo y medición continua de esta variable pues para realizarlo se podía apelar a la medición manual, con instrumentos como un amperímetro digital, la cual es imprecisa y muy engorrosa, porque se tiene que estar anotando todos los cambios perceptibles a lo largo del proceso y después realizar los cálculos correspondientes, o a la ficha técnica suministrada por el fabricante la cual también es imprecisa ya que abarca sólo el caso de máximo consumo, valor que no se alcanza en todo tipo de piezas. Se tiene en cuenta el hecho de que la precisión de la medición es importante no solo desde el punto de vista del ahorro, sino también para la optimización del diseño y fabricación al menor costo y la mayor calidad posible, es decir, lograr la sostenibilidad.

En la Figura 4 se pueden apreciar a simple vista varias de las características distintivas de la herramienta de análisis:

1. El eje de tiempo con precisión de segundos, permite observar el instante de ocurrencia de eventos.
2. Es fácil calcular la duración de un evento.
3. Se puede mostrar máximo, mínimo y promedios.
4. Muchas de las características son opcionales y selectivas.
5. Herramientas para adecuar el gráfico al análisis.
6. Se muestran también los resultados numéricos.
7. Permite documentar con foto el análisis para su inclusión en trabajos científicos. Ejemplo la Figura 4.

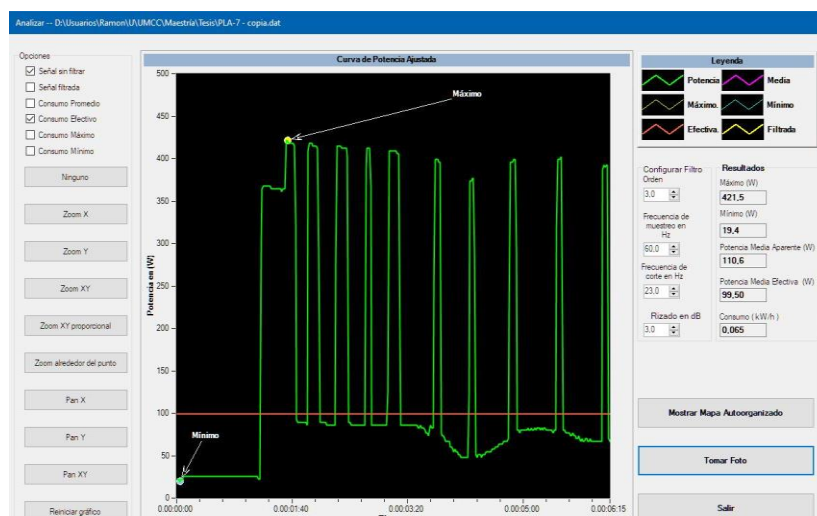


Figura 4. Detalles de la ventana de análisis

Conclusiones

El dispositivo acondicionador que se diseñó y fabricó, acondicionó apropiadamente las señales provenientes del sensor. El programa que se desarrolló para el monitoreo y control de la interfaz respecto al sensor que se instaló, permitió medir, registrar, visualizar, analizar el comportamiento y determinar el consumo eléctrico total. La calibración del sistema obtenido mediante el empleo de un instrumento de precisión (FLUKE 376) demostró la exactitud de las mediciones obtenidas. La red neuronal multicapa desarrollada para la creación del mapa autoorganizado de patrones, funcionó según lo esperado y quedó a la espera de la determinación de los patrones de consumo. En la validación de los casos estudiados, facilitó hacer un análisis detallado del consumo de energía eléctrica de cada uno y permitió la adopción de medidas apropiadas para contribuir a su sostenibilidad.

Referencias bibliográficas

ABUR, A., F. ALVARADO, C. BEL, C. CAÑIZARES, et al. *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. Edtion ed.: McGraw-Hill, 2002. ISBN 844813592X.

ACOSTA, T. R., G. L. C. MÉNDEZ y M. F. LOM Sistema de monitoreo de consumo eléctrico inalámbrico y analizador de la calidad de la energía. In *Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.*, 2017.

CRUZ VEGA, M., P. OLIETE VIVAS, C. MORALES RIOS, L. C. GONZÁLEZ, et al. *Las tecnologías IOT dentro de la industria conectada: Internet of things*. Edtion ed.: EOI Esc. Organiz. Industrial, 2015.

ENERGY, O. CT sensors - Interfacing with an Arduino. In., 2019.

LAGE DÁVILA, A. Conectando la ciencia a la economía: las palancas del socialismo. In *Revista Cuba Socialista*. 2007, p. 2-26.

LARA SOBRINO, J. D. J. Aplicación web para la gestión de solicitudes de almacén en la Dirección Provincial de Bufetes Colectivo Matanzas. Universidad de Matanzas, 2019.

MARTIN, S. F. Adquitectura de software SIEM para el monitoreo en línea del consumo de energía eléctrica en un entorno residencial utilizando un algoritmo inteligente. Universidad Autónoma Querétaro, 2018.

MONTORO, J. M. Instrumento virtual basado en arduino, para la medida y caracterización de circuitos lineales. Trabajo Fin de Grado Escuela Politécnica Superior de Linares, 2016.

NOVILLO VICUÑA, J., D. L. HERNANDEZ ROJAS, B. MAZÓN OLIVO y K. D. CORREA ELIZALDES Monitoreo inalámbrico de señales eléctricas de voltaje 110/220V a través de Arduino. *Alternativas*, 2018, 19(1), 55-62.

NÚÑEZ BARRETO, Á. A. El costo de un kilowatt hora. In., 2020, vol. 2020.

PÉREZ BARRETO, J. Diseño de una red basada en el bus CAN para la adquisición de datos 2019.

PRESSMAN, R. S. *Ingeniería del software. UN ENFOQUE PRÁCTICO*. Edtion ed.: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-607-15-0314-5.

QUESADA, J. G. *Tutorial de Análisis Numérico Interpolación: Splines cúbicos*. Edtion ed.: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2000.

RIVAS CÁRDENAS, F. E. diseño y construcción de una aplicación móvil para la medición y monitoreo de señales de corriente eléctrica utilizando arduino 2017.

RUIZ ARIZA, J. D. Sistema de Control y Monitoreo de Consumo Energético para Equipos de Climatización Orientado a Internet de las Cosas (IoT). UNIVERSIDAD DE LA COSTA, 2019.

SUÁREZ RODRÍGUEZ, J. A., P. A. BEATON SOLER y R. FAXAS ESCALONA Estado y perspectivas de la energía fósil en Cuba. *Tecnología Química*, 2011, 31(2), 88-94.