

Implementation and review of current sensors precision in Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) for Residential Electrical Systems

E. Vázquez González *member IEEE*, J.A. López Hernández, A. Carreón Jafeth

Abstract—The objective of this paper is to implement with the maximum possible accuracy a Non Invasive Load Monitoring System based on a 8-bit microcontroller, meeting the specifications of maximum currents for residential electrical installations (30 Amperes) established in the Mexican Official Standard 001-SEDE-2012 Electrical Installations (use). The statistical method of variance was used to verify the accuracy of measurement at low power of the current sensors in the noninvasive monitoring system. The results obtained through this system, lesser powers from 0 to 10w could not be reliably measured, powers from 11up to 50 watts give an average error accuracy of 35.79%, while powers above 300 watts showed an average error 0.63%, this after implementing a calibration algorithm to reduce the error by measuring using noninvasive current sensors.

Keywords: Energy measurement, non-invasive treatment, advanced metering infrastructure, current sensor, smart grids, load monitoring, Load Signals, NILM, AMI

Resumen—El objetivo de este artículo es la implementación con la máxima precisión posible, de un sistema de monitoreo de cargas no invasivo en un microcontrolador de 8 bits, cumpliendo con las especificaciones de corrientes máximas para instalaciones eléctricas residenciales (30 Amperes) establecidas en la Norma Oficial Mexicana 001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas (utilización). Se utilizó el método estadístico de la varianza para verificar la precisión en medición a bajas potencias de los sensores de corriente en un sistema de monitoreo no invasivo. Los resultados obtenidos por medio de este sistema entregaron que las potencias menores a 10w no pudieron ser medidas de manera confiable, las potencias de 11 watts a 50 watts muestran un error de precisión promedio de 35.79 %, mientras que las potencias mayores a 300 watts mostraron un error promedio de 0.63 %, esto después de implementar un algoritmo de calibración, para reducir el error por medio de la medición de sensores de corriente no invasivos.

Palabras clave: Medición de energía, tratamiento no invasivo, infraestructura de medición avanzada, sensor de corriente, redes eléctricas inteligentes, monitoreo de cargas, señales de carga, NILM, AMI

Manuscrito enviado a revisión el 15 de Mayo del 2016; Manuscrito enviado a revisión el 15 de mayo del 2016; este proyecto, artículo, y ponencia fueron financiados por el Dr. Vicente Vázquez Ortega de manera privada como parte del proyecto de tesis de investigación de licenciatura con miembros del jurado ICE/CP-06-V/15 el 16 de diciembre de 2015

Erick Vázquez González, perteneció a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME Zacatenco), Av. Instituto Politécnico Nacional S/N, Gustavo A. Madero, Lindavista, 07738 Ciudad de México, D.F. (e-mail: ergovazquez@esimez.mx)

José Antonio López Hernández, pertenece al Centro de Investigación e Innovación tecnológica (CIITEC), Cerrada de Cecati s/n, Azcapotzalco, Santa Catarina, 02250 Ciudad de México, D.F. (e-mail: jalopez@ipn.mx)

Jafeth Alonso Carreón, pertenece a la academia de computación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), unidad profesional Zacatenco (Edificio 5, 1er piso) (e-mail: jalonso@ipn.mx)

I. INTRODUCCIÓN

NILM: (*Non Intrusive Load Monitoring*) (Monitoreo de cargas no invasivo) - Son equipos de medición capaces de cuantificar el nivel de consumo energético en toda una instalación eléctrica residencial, usualmente son instalados a la entrada del servicio de la instalación eléctrica bajo medición (acometida), debido a que utilizan un solo sensor en la acometida y unos cuantos adicionales en cada uno de los circuitos derivados. También reciben el nombre de monitoreo de cargas a nivel circuito.

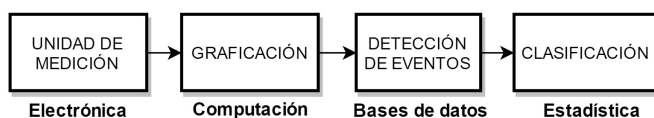


Figure 1: Diagrama a bloques básico de un sistema NILM

Para lograr esto se requiere de la integración de proyectos interdisciplinarios (figura 1) para la generación de sistemas de información en tiempo real que permitan una gestión adecuada de la red eléctrica bajo medición. A diferencia de los medidores AMI (Infraestructura de Medición Avanzada) que permiten actualizar sus lecturas con intervalos en minutos (en intervalos de 5, 15 o 60 minutos), lo cual permite el monitoreo de los puntos de distribución por parte del proveedor de energía eléctrica, los sistemas NILM suelen actualizar sus lecturas en segundos (Intervalos de 10 segundos o menos), y proveen información en tiempo real usuario, esto por medio de sistemas de información basados en computadora; Si bien estos medidores por si solos no mejoran la eficiencia energética, son responsables de proveer información al usuario sobre lo que está sucediendo en su red eléctrica.

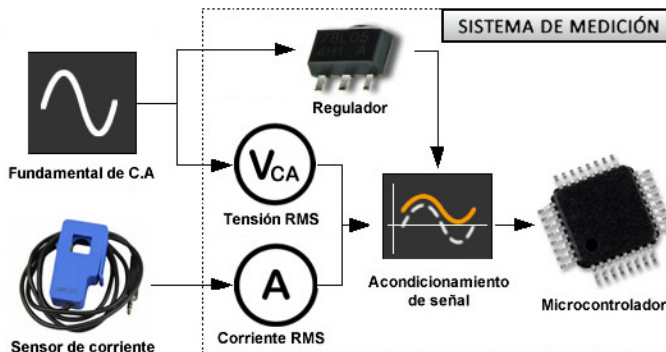


Figure 2: Adquisición de señales de un sistema NILM

La principal relevancia del monitoreo de cargas es el incremento del consumo eléctrico en el sector residencial en los últimos 40 años [2], que se debe a la alta penetración

de dispositivos TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) [5]. Está demostrado, que la efectividad de los programas de eficiencia energética depende fuertemente de la retroalimentación que reciben los usuarios acerca de su uso, los ahorros más significativos se logran proveyendo a los usuarios de información en tiempo real, sobre cuanta energía consume su instalación en tiempo real, lo que puede llegar a traducirse en ahorros de hasta 19.5% [3].

Los sistemas NILM son un campo de investigación que inicio en 1985 con un reporte escrito por George W. Hart para el Instituto de Investigaciones de Electrónica de Potencia *Electric Power Research Institute* (EPRI) [7]. Los sistemas NILM suelen ser utilizados para realizar procedimientos de desagregación de la energía (*Energy Disaggregation*) estos procedimientos, permiten identificar que cargas eléctricas (electrodomésticos) están trabajando en el hogar, usando solo la potencia que fluye por los conductores eléctricos. Algunos de estos sistemas utilizan un análisis armónico eléctrico para realizar análisis de calidad de energía y para la identificación de los dispositivos en la red eléctrica, por medio de análisis de firmas de cargas (*Load Signatures Analysis*) [10].

La aplicación de los sistemas NILM suele estar pensada para en llenar el vacío entre los sistemas AMI y los EMS (*Energy Management Systems*) industriales. Su función principal es ayudar a los ocupantes a entender cómo y en dónde se está utilizando la energía, para que los usuarios puedan conservar el ambiente, ahorrar dinero, o ambos.

Debido a la naturaleza interdisciplinaria de los sistemas NILM (figura 1), que involucran a las áreas de computo, electrónica, eléctrica, procesamiento de señales digitales, sistemas de información, redes, estadística, redes neuronales, algoritmos de aprendizaje, existe una confusión sobre la manera de medir la precisión de estos dispositivos, una revisión de algoritmos NILM realizada en [1], se llegó a la conclusión de que no se ha estandarizado una manera de medir el rendimiento de precisión de los sistemas de monitoreo no invasivo, a pesar de que varios investigadores utilizan las formas más básicas de medición del error que giran alrededor de la ecuación 1.

$$Error = \frac{Valor\ Exacto}{Valor\ Exacto + Valor\ Medido} \quad (1)$$

Omitiendo información relevante sobre el margen de error a distintos rangos de medición de potencias, que puede afectar de manera severa las mediciones de sus instrumentos de medición a bajas potencias.

Parte de la implementación de este trabajo establece y ejecuta la implementación de un sistema de calibración interno el cual después es verificado por medio del proceso estadístico de la varianza de las mediciones resultantes del sistema de medición, esto para comprobar la precisión en la medición del sistema.

II. MEDICIÓN DE POTENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS RESIDENCIALES

Los medidores AMI actualmente instalados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en México y desarrollados por diversas empresas, (IUSA, PROTECSA e ITRON) son capaces de medir la potencia real, reactiva y consumo energético de las instalaciones en las que son instalados, pueden enviar información periódicamente al proveedor por medio de un concentrador, sobre su estado y consumo energético.

Actualmente en México y el mundo, los usuarios de electricidad residenciales, solo se les factura la potencia real, esto es debido a que, originalmente la mayor parte de las

cargas en las Instalaciones Eléctricas Residenciales (IER), eran predominantemente resistivas, para el diseño y cálculo de balanceo de fases y de protecciones termo magnéticas, se ha estandarizado el valor de 0.9 para el factor de potencia (FP) esto de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas (utilización).

Sin embargo, con los avances tecnológicos y generalización del uso de las TIC, poco a poco se están comenzando a introducir cada vez más cargas reactivas de potencia en una mezcla de focos eficientemente energéticos, como las lámparas fluorescentes compactas, luces basadas en LED, y fuentes de conmutación (basadas en modulación por ancho de pulsos), y equipos electrónicos modernos. Como resultado lentamente, los problemas del desaprovechamiento de energía (bajo factor de potencia) está pasando del sector industrial, al residencial por medio de la electrónica de consumo lo que podría presentar factores de potencia menores a 0.9.

El sector industrial ha realizado importantes inversiones en el desarrollo de EMS, esto debido a que el sector industrial (sistema no lineal), sufre de penalizaciones económicas por parte de las empresas de suministro eléctrico al no mantener un factor de potencia mayor a 0.9, lo que lo obliga a instalar bancos de capacitores en sus instalaciones para compensar un bajo factor de potencia, y realizar estudios de calidad de energía para monitorear las Distorsiones armónicas en sus sistemas eléctricos. A diferencia del sector industrial, en el sector residencial el factor de potencia continúa siendo irrelevante en el proceso de facturación de las instalaciones eléctricas residenciales, esto a pesar de la proliferación de dispositivos electrónicos con fuentes conmutadas, que pueden afectar de manera relevante la potencia en las redes eléctricas, esto ha resultado en regulaciones de corrección de factor de potencia como la EN61000-3-2 (Norma internacional que dicta requisitos de corrección de factor de potencia) [4].

III. ESTADO DEL ARTE

Debido al crecimiento con una tendencia lineal en el consumo eléctrico a nivel internacional [2], existe un interés renovado en entender y reducir las pérdidas de energía el consumo energético en las IER, desde el desarrollo del primer sistema NILM, en 1985 nuevas técnicas se han ido adaptando para mejorar su desempeño moviéndose lentamente al dominio digital, en donde es posible aplicar técnicas de etiquetado automático de información, aprendizaje de máquinas, inteligencia artificial, redes neuronales, utilizando los registros de los puntos de distribución finales ligados a un servidor. La integración de los sistemas de información basados en computadora para generar análisis en tiempo real de las redes eléctricas permite la implementación de algoritmos de aprendizaje activo; entre los proyectos de investigación más recientes en los últimos siete años se encuentran:

En 2009, *ACme* desarrollado por la universidad de California, Berkley, es un proyecto de código abierto con un sistema de información para la medición inalámbrica de energía y potencia, está basado en el protocolo IPv6, lo que permite una comunicación directa con los nodos de medición y utiliza el circuito integrado ADE7753 con una medición diferencial desarrollado por Microchip (para mediciones monofásicas) [8].

En el año 2010, *PowerNET* en la universidad de Stanford busco caracterizar 138 equipos de su infraestructura de computo en términos de la utilización de la energía con el objetivo de obtener altos volúmenes de información para encontrar mecanismos de disminución en el consumo energético de un edificio (computadoras, servidores y enrutadores) [9].

En el 2014, la Universidad Taiwanesa de Ciencia y Tecnología en Taipei, Taiwan realizó un estudio, construyó un sistema monofásico desbalanceado de 3 circuitos derivados utilizando un sistema *Intel Atom Embedded Board* y *LabView*, implementando un algoritmo *PSO Particle Swarm Optimization* para optimizar los parámetros de propagación en redes neuronales artificiales (BP-ANN) [12].

Desde el 2015, la universidad de Cornell trabaja en arquitecturas de redes neuronales de aprendizaje profundo para sistemas NILM con el propósito de obtener un sistema de auto-aprendizaje y poder entregar al usuario una facturación segmentada por dispositivos del hogar (su costo y uso de energía) [11].

En 2016, el departamento de Ciencias Computacionales en la Universidad de Victoria, Canadá, estudia métodos de desagregación de energía para reducir la complejidad computacional, buscando asegurar la precisión de medición en experimentos en tiempo real [14].

Además de esos proyectos de investigación, existen diversos productos comerciales de distintas compañías en el ámbito internacional estas han creado soluciones NILM, ofreciendo prestaciones adicionales a los consumidores como el monitoreo del costo de la energía en tiempo real, compañías como: *TheEnergyDetective*, *myEnergy*, *Owl*, *CurrentCost*, *Smappee*, *Circutor*, *Energy Monitoring*, *OpowerHomeEnergyReport*, *PeoplePower*, *SmartEnergyGroups*, *ThingSpeak* y *EngageEnergy*. Estas compañías ofrecen al usuario de energía eléctrica residencial, monitorear su consumo energético en tiempo real, generar reportes de consumo y recibir información sobre cómo ahorrar energía. Su funcionamiento básico es, enviar la información a un concentrador para su posterior transmisión, procesamiento y presentación a través de un portal web el cual el usuario puede consultar desde su computadora o teléfono inteligente, estas soluciones son una herramienta para comprender el uso de energía que están fundamentalmente limitados a la medición a nivel circuito residencial (30 Amperes).

La aplicación del análisis de firmas de cargas, utilizada para identificar patrones de comportamiento en las redes eléctricas también es comercializada por distintas compañías, sin embargo, los detalles sobre su precisión de medición suelen ser intencionalmente omitidos en las aplicaciones comerciales [13].

IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El bloque inicial (figura 2), está compuesto por la medición de la tensión y la corriente directamente en el centro de carga de la instalación eléctrica, este proceso se lleva a cabo por medio de sensores de corriente y un transformador de bajada con una salida a 9v, estas señales son acondicionadas y se hacen llegar a un microcontrolador alimentado por el mismo circuito, el cual debe procesar los valores de corriente RMS, tensión RMS, potencia real, potencia aparente y factor de potencia por medio de código.

IV-A. Adquisición de señal

La señal de tensión es adquirida por medio de un transformador reductor mientras que la señal de corriente es obtenida a través de un sensor de corriente con su respectiva resistencia de carga, para obtener un valor de referencia (figura 3) para poder ser cuantizado por el Convertidor Analógico Digital del

microcontrolador a una frecuencia de 8000kHz. Este valor es suficiente ya que, en México, la frecuencia fundamental de una onda senoidal es de 60Hz por lo que se está muy por arriba de las condiciones propuestas por el teorema de Nyquist logrando así evitar el efecto *Aliasing*.

IV-B. Acondicionamiento de señal

Los parámetros principales a obtener son la tensión y corriente de la suma de las cargas, esto le permite al microcontrolador procesar valores al dominio discreto y de esta manera el voltaje de referencia de corriente continua sobre el cual estará montada la señal senoidal será $V_{ref}/2$. Para lograr esto el circuito cuenta con dos componentes principales, un divisor de voltaje y un capacitor de paso.

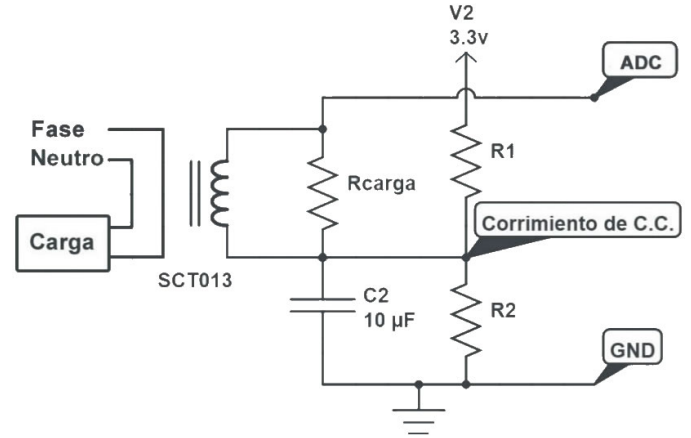


Figure 3: Acondicionamiento de señal

El divisor de tensión (figura 3) se compone de dos resistencias del mismo valor con un valor óhmico elevado con el propósito de cumplir con la característica de bajo consumo energético.

$$V_{ref} = \frac{R1}{R1 + R2} * V_{entrada} = \frac{V_{entrada}}{2} \quad (2)$$

Es posible utilizar cualquier valor de resistencias, el divisor siempre otorgará el mismo resultado siempre y cuando los valores de $R1$ y $R2$ sean iguales, figura.

IV-C. Adquisición de muestras

El procesamiento inicia con los valores cuantizados de los ADC (figura 4), estos son cuantizados por el convertidor analógico digital, las señales puras son filtradas por medio de un filtro digital pasa bajas, para remover el corrimiento corriente continua en el dominio digital, una vez filtradas es posible realizar la detección del Cruce por Cero para garantizar que el cálculo de factor de potencia (desplazamiento de fase) sea correcto.

En el dominio digital, los valores RMS de tensión y corriente son definidos como la raíz cuadrada de la media de los valores instantáneos para una cantidad periódica, promediada sobre un ciclo completo esto es obtenido por medio de la ecuación 3.

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} u^2(n)}{N}} \quad (3)$$

La corriente se calcula con la misma ecuación, sustituyendo, las muestras de tensión $u(n)$ por muestras de corriente $i(n)$

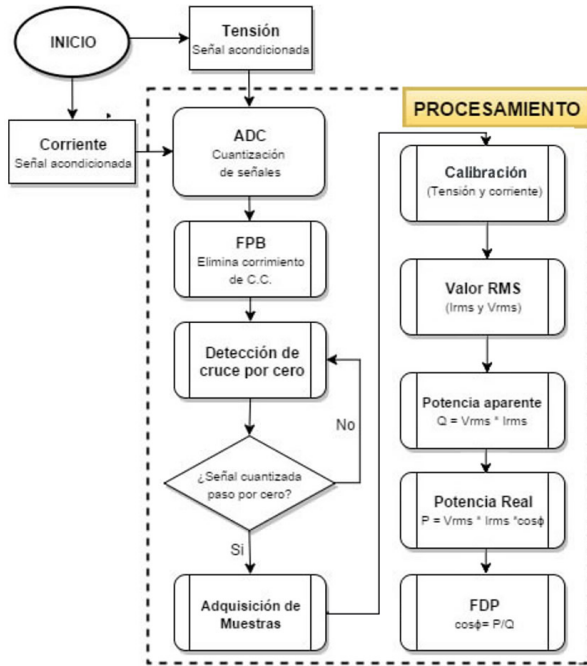


Figure 4: Flujo de datos en el microcontrolador

El algoritmo de detección de Cruce por Cero también es usado para realizar un compendio de muestras que serán promediadas, por el valor dado de los cruces por cero, los valores promediados permiten obtener un valor certero de los valores medios cuadráticos de tensión y corriente, utilizados para el cálculo RMS de los mismos.

IV-D. Calibración

Es imposible diseñar circuitos con absoluta precisión, en términos económicos, entre más caro es el proceso de acondicionamiento, más preciso es. Asumiendo que el circuito es perfecto y los valores de los componentes son exactos, aún existen factores físicos que contribuyen a la incertidumbre en la medición de la corriente del sistema: la relación del bobinado, el valor de la resistencia de carga, precisión del ADC y la temperatura ambiental, motivos suficientes para implementar un algoritmo de calibración definido por la ecuación 4.

$$x_{Cal} = Cal * \left(\frac{Lectura\ correcta}{Lectura\ medida} \right) \quad (4)$$

El algoritmo configuración contiene las variables de calibración, estas se utilizan para ajustar los valores RMS de salida con el propósito de compensar el posible error inducido por la medición no invasiva utilizando otros instrumentos de medición, de esta manera es posible lograr una lectura más certera de los valores de tensión y corriente que al ser compensados pueden igualar a cualquier otro instrumento de medición, o si se cuenta con ella calibrarlo con una carga de referencia normalizada. La calibración altera directamente los resultados del cálculo de la potencia real, potencia aparente, y factor de potencia. Una vez instalado el dispositivo se calibra la tensión y corriente del dispositivo utilizando un multímetro certificado, para poder iniciar las mediciones.

V. RESULTADOS

V-A. Error en medición (varianza)

Se tomaron 8 registros: Carga resistiva, Factor de potencia, Medición RMS, Medición TrueRMS, Medidor electromecánico, Medidor AMI, Medición puntual y estadística. La medición de varianza, fue utilizada sobre una carga resistiva y un variac, al cual se le fue incrementando el valor de 0 a 127v de tensión de salida mientras se calculó el valor teórico para ser cotejadas utilizando la ecuación 5.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

La información generada es almacenada en una hoja de datos con el propósito de calcular la potencia teórica, media, los porcentajes de error máximos, mínimos, promedio. Se calculó la precisión del sistema de medición y se comparó con el valor teórico, dado por la carga resistiva y variac, para obtener la desviación estándar del sistema de medición por medio de la fórmula 6

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (6)$$

Obteniendo como resultado la información en la figura 5

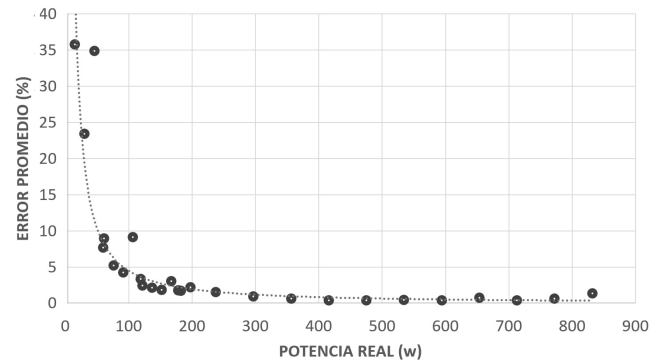


Figure 5: Curva de calibración (Error Promedio)

El cuadro I contiene los valores de error promedio y error máximos registrados en el proceso estadístico.

Table I: Cuadro de porcentaje de error de la figura 5

| Potencia (W) | (%)Error Max. | (%)Error Prom. |
|--------------|---------------|----------------|
| 0 - 15 | 60.26 | 35.79 |
| 11 - 50 | 34.34 | 22.43 |
| 51 - 100 | 10.69 | 6.89 |
| 101 - 200 | 4.84 | 3.2 |
| 201 - 299 | 2.62 | 2.19 |
| >300 | 0.94 | 0.63 |

En donde las potencias menores a 15 watts no pudieron ser medidas de manera confiable, mientras que para potencias mayores a 300w hay un error máximo de 0.94% y un error promedio de 0.63% para alcanzar este grado de precisión, es necesario llevar a cabo el proceso de calibración.

V-B. Verificación algoritmo cruce por cero

Para obtener los valores teóricos de este circuito RL en corriente alterna, se mide la tensión de la línea, verificando de antemano que no exista una alta presencia de distorsión

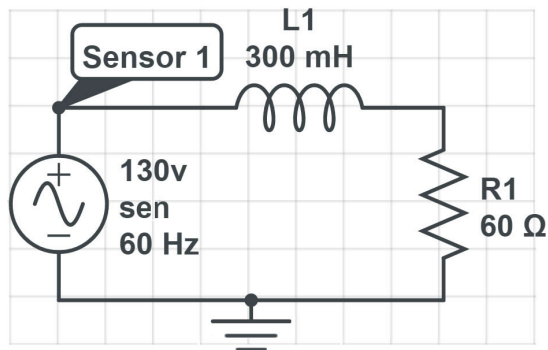


Figure 6: Circuito RL para prueba de factor de potencia

armónica total, verificada la tensión, se utilizan los datos del circuito bajo medición proporcionados en la figura 6.

Una vez calculados, se inició la medición con distintos instrumentos en el laboratorio, para cotejar la validez de las mediciones del sistema prototipo calibrado en contra de otros instrumentos de medición, esto debido a la falta de una carga de calibración estándar que permitiese establecer un valor de calibración fijo del sistema, los resultados se muestran en el cuadro II.

Table II: Lecturas obtenidas de los instrumentos.

| Mediciones para carga 0.3Hy | | | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|----------|--------|-------------|
| | V.Teórico | Prototipo | Fluke302 | DW6063 | Kill-a-watt |
| Corriente (A) | 1.01 | 0.97 | 1.2 | 0.979 | 0.96 |
| VRMS (V) | 130 | 129.1 | 130 | 130.3 | 128.8 |
| P. Real (W) | 60.39 | 55.06 | n/a* | 57.5 | 58 |
| P. Aparente (VA) | 130.76 | 121.94 | n/a* | n/a* | 123 |
| FP | 0.46 | 0.44 | n/a* | 0.45 | 0.46 |

* El instrumento de medición dispositivo no es capaz de mostrar el valor.

Los valores coinciden con un bajo margen de error con los de otros instrumentos, por lo que se verifica que el sistema prototipo, así como el algoritmo desarrollado, realiza sus mediciones de manera adecuada.

V-C. Medición de factor de potencia en una IER

La figura 7 contiene los resultados de la medición individual de factor de potencia de cada electrodoméstico en una IER, los electrodomésticos con bajo factor de potencia (sea por diseño o antigüedad) son mostrados de derecha a izquierda; estos dispositivos pueden considerarse como dispositivos que derrochan energía.

V-D. Medición de potencia en tiempo real

La información generada es almacenada en un sistema de información el cual permite graficar los valores deseados en el tiempo, posteriormente se realizó una medición general de la acometida y 2 fases de una IER con el propósito de graficar los valores de potencia real, con intervalos de 5 segundos y verificar las consistencias de los datos graficados.

La figura 8 muestra la medición simultánea de potencia activa, lo cual permite discriminar de manera visual distintos electrodomésticos en la instalación, donde CT1 pertenece a la acometida del sistema, CT2 pertenece a la instalación de la sala de estar con distintos dispositivos y el circuito CT3 corresponde a la cocina en donde se activa periódicamente el refrigerador, esta grafica muestra ocasionalmente picos en la

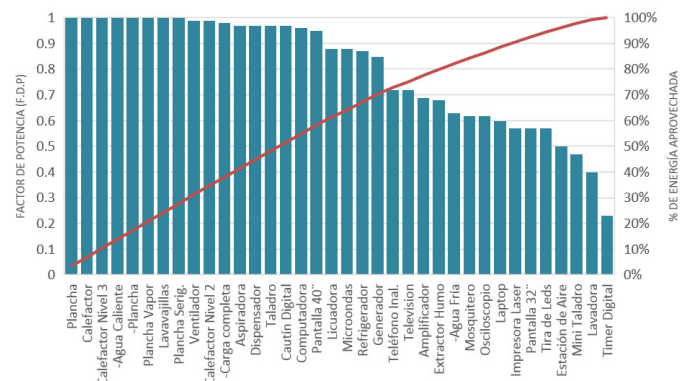


Figure 7: Factor de potencia de distintos electrodomésticos

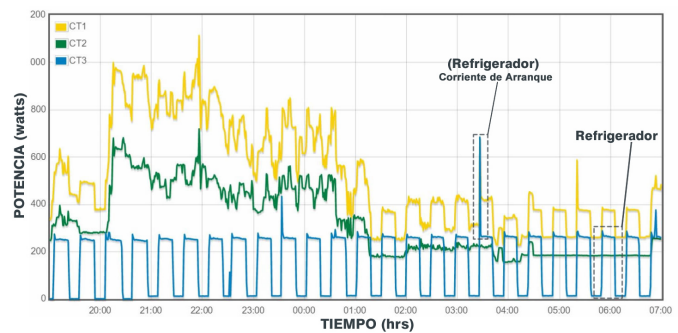


Figure 8: Potencia de 3 sensores de corriente en la IER

potencia, resultado de las corrientes de arranque del refrigerador, sin embargo debido a que el registro de información se realiza cada 5 segundos, sin embargo la prueba muestra que es posible hacer una identificación de estados de encendido y apagado de los distintos electrodomésticos de la instalación.

VI. CONCLUSIONES

Es posible implementar un sistema NILM en un microcontrolador con un ADC de resolución de 8 bits, trabajos intensivos en distintos países han sido ejecutados, en el campo de los sistemas NILM, sin embargo, aún se trabaja en una solución no invasiva confiable que permita identificar con precisión electrodomésticos a bajas potencias. Si bien cada investigador desarrolla sus propios métodos de medición y prueba, es necesaria la propuesta de una metodología general que permita verificar con precisión la desviación estándar y la medición a bajas potencias de los sistemas NILM. Existen 3 conclusiones importantes en el desarrollo e implementación de este sistema de medición.

Calibración: Idealmente el algoritmo de calibración debe ser realizado una sola vez por medio de una carga de calibración estándar y estas mediciones deben ser verificadas por medio de un proceso estadístico (no puntual) para obtener una lectura correcta

Acondicionamiento de señal: El acondicionamiento de señal tiene un impacto directo sobre el ADC a bajas potencias (menores a 50w), incluso cuando no fluye corriente por el conductor, los sensores de corriente registran una lectura, errónea, este error puede ser causado por el error de cuantización del microcontrolador, este error es inevitable y generado por el bit menos significativo (LSB) con un valor de 0.5 de acuerdo a la hoja de datos, incluso en una medición perfecta, el ADC estar

a errado por un margen de 0.5 LSB, por lo que la elección de un microcontrolador o procesador e señales digitales con un menor LSB, así como utilizar componentes de alta precisión en el acondicionamiento de señal pueden permitir una mejora en el error generado por el ADC.

Graficación de información: Como se mostró en la figura 8 para obtener información relevante y registrar todos los eventos, de la red eléctrica es necesario establecer tiempos menores a 5 segundos, debido a que no hay una consistencia en la información graficada en cuanto a las corrientes de arranque.

El margen de error inducido por la medición de corriente no invasiva incluso después de cumplir con requisitos mínimos de calibración está muy cerca del 50% equivalente a no poder ser medido con precisión. Si bien es anormal que no exista un flujo de corriente eléctrica en una IER debido a que los dispositivos conectados a la red consumen energía aun en su modo de hibernación, este error inducido por los distintas variables no puede ni debe ser omitido en la aplicación de algoritmos de desagregación de energía. El algoritmo de calibración y permite la construcción de un sistema electrónico este método no implica ningún tipo de clasificación ni implica ningún juicio con respecto a la exactitud del instrumento, ya que este depende del diseño y construcción, así como de su calibración, independiente de si es de Primer Orden o de Segundo Orden siempre y cuando se cumplan los fundamentos básicos de acondicionamiento y procesamiento de señales digitales, sobre la cual es posible experimentar y poner a prueba nuevos algoritmos pertinentes que permitan la verificación y validación de sus mediciones en la aplicación futura de algoritmos de desagregación de energía.

Los resultados del experimento de lectura individual de factor de potencias (sección V-C), muestran que 19 de 36 electrodomésticos en el hogar poseen un factor de potencia menor a 0.9 y la proliferación de sistemas no lineales en las IER nos lleva a replantear el paradigma actual sobre el aprovechamiento de energía en las IER y si la irrelevancia del aprovechamiento de la energía en las instalaciones eléctricas residenciales continuara siendo irrelevante o si se empezara a tomar en cuenta para la facturación del servicio residencial.

Los resultados del experimento de medición de potencia en tiempo real (sección V-D), demuestran que la importancia de obtener muestras de potencia en IER con periodos de tiempo menores a 5 segundos, para obtener de manera constante mayor información sobre los estados transitorios de los sistemas de la instalación, esto podría traducirse en una mejor adquisición de muestras y algoritmos precisos algoritmos de desagregación de la energía.

RECONOCIMIENTOS

Al Dr. José Martínez Trinidad por permitirme el tiempo para poder realizar este trabajo de investigación y al Dr. Leonardo Badillo Malacara por la revisión en el proceso estadístico en las pruebas del sistema de medición.

REFERENCIAS

- [1] Stephen Makonin, Fred Popowich *Nonintrusive Load Monitoring (NILM) Performance*, Simon Fraser University, 2014
- [2] International Energy Agency *Consumo de energético (kWh per cápita)*, Estadísticas de energía de países no pertenecientes a la OCDE, 2012
- [3] Dan York, Maggie Molina, Max Neubauer, Seth Nowak, Steven Nadel, Anna Chittum, Neal Elliott, Kate Farley, Ben Foster, Harvey Sachs, and Patti Witte, *Next Generation Programs Reach for High Energy Savings*, Research Report U131, 9 January, 2013.
- [4] EDN - Margery Conner *New power regulations bring power-factor correction to lower-power supplies*, article, 26 August 2010

- [5] REMODECE *Residential Monitoring to decrease Energy use and carbon emissions in Europe*, ISR-University of Coimbra, November 2008.
- [6] C. Laughman, K. Lee, R. Cox, S. Shaw, S. Leed, L. Norford, and P. Armstrong, *Power signature Analysis*, Power and Energy Magazine, IEEE, 1(2):56-63, Mar-Apr 2003.
- [7] G. Hart, *Residential energy monitoring and computerized surveillance via utility power flows.*, Technology and society magazine, IEEE, 8(2):12-16 Jun 1989.
- [8] X. Jiang, S. Dawson-Haggerty, P. Dutta, and D. Culler *Design and implementation of a high-fidelity AC metering network.*, In Proceedings of the 8th ACM/IEEE International conference on information processing in sensor networks (IPSN 09, 2009).
- [9] M. Kazandjieva, B. Heller, D. Gal, P. Levis, C. Kozyrakis, and N. McKeown, *PowerNet: A magnifying glass for computing system energy*, In Standford Energy & Feedback Workshop: End Use Energy Reductions through Monitoring Feedback and Behavior Modification, 2008
- [10] Hart, G.W. *Nonintrusive appliance load monitoring*, Proceedings of the IEEE, 1992
- [11] Jack Kelly, William Knottenbelt. *Neural NILM: Deep Neural Networks Applied to Energy Disaggregation*, Cornell University Library, 2015
- [12] Hsueh-Hsien Changa, Putu Wegadiputra Wirathab, Nanming Chenb *Non-intrusive Load Monitoring System Using an Embedded System for Applications to Unbalanced Residential Distribution Systems*, Energy Procedia Volume 61, 2014, Pages 146–150, 2014
- [13] M. Baker, G Hicks *Test of Commercially Available Products for Estimating End Uses from Smart Meter Data*, SBW, 2016
- [14] Guoming Tang and Kui Wu *Occupancy-aided Energy Disaggregation*, Dept. of Computer Science, University of Victoria, B.C., Canada, 2016

BIOGRAFÍA CORTA DE LOS AUTORES



Erick Vázquez González (M'16) Nació en la ciudad de Durango, México en 1987, es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica con especialidad en computación desde el año 2016 por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Sus intereses de investigación incluyen, energías renovables, análisis de distorsiones armónicas (THD), diseño electrónico y sistemas de monitoreo no invasivos (NILM).



Jose Antonio López Curso la maestría en sistemas con especialidad en Sistemas de Información es Ingeniero en Robótica Industrial desde el año 1998, actualmente se desempeña como Ingeniero de Diseño en el Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (CIITEC) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). De 2001 a 2012 a formado parte de 27 proyectos de investigación aplicada, vinculados en el sector público y privado.



Alonso Carreón Jafeth Maestro en Ciencias de Ingeniería en Sistemas Computacionales por la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) desde el año 2008 e Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) profesor de tiempo completo adscrito a la academia de computación.