



Prototipo de sistema de medida para una instalación eléctrica residencial de topología variable

Measurement system prototype for a residential electric installation with variable topology

P. Bautista¹, B. Díaz², A. Vega³, A. Espinel⁴

Fecha de recepción: Agosto 28 de 2015

Fecha de aceptación: Septiembre 25 de 2015

Como citar: Bautista, P., Díaz, B., Vega, A., & Espinel, A. (2015). Prototipo de sistema de medida para una instalación eléctrica residencial de topología variable Revista Tecnura, 19 (CITIE), 57-65. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.ICE.a6

Abstract

This paper presents a prototype measurement system accuracy for use in a residential electrical installation with variable topology with renewable energy sources and also it has the public grid supply; the system performs monitoring and control of electrical parameters in each circuit and measures the power consumption by users. To develop an integrated circuit called ADE7763 (Devices, ADE7763 datasheet) was chosen, with high level of accuracy for the voltage and current measurements and serial communication (SPI "Serial Peripheral Interface") (Arduino, s.f.) with *Arduino* device is implemented as master device to communicate, making the system calibration was performed to determine its accuracy and the ability to use it reliably in a real system. The term variable topology refers to the ability of an installation for dynamically change its settings by switching circuit for selecting one or other power source and supply the load more efficiently.

Keywords: Electrical installation, Arduino, ADE7763, Variable Topology, Energy meter.

Resumen

En este artículo se propone un prototipo de sistema de medición de precisión para ser utilizado en una instalación eléctrica residencial de topología variable con fuentes de energía renovable que cuenta también con suministro de la red de distribución pública; el sistema realiza supervisión y control de los parámetros eléctricos en cada circuito y medidas del consumo de energía por parte de los usuarios. Para el desarrollo se eligió un circuito integrado ADE7763 (Devices, ADE7763 datasheet), que cuenta con buen nivel de precisión para realizar la medidas de tensión y corriente y se implementó la comunicación serial (SPI "Serial Peripheral Interface") (Arduino, s.f.) con *Arduino* como dispositivo maestro para la comunicación, con lo cual se realizó la calibración del sistema para determinar su precisión y la posibilidad de

¹ Estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: Paula.bautista620@gmail.com

² Estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: briand852@hotmail.com

³ Ingeniera Industrial–Universidad América–Colombia., Maestría Ingeniería Industrial–Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. Contacto: avegae@udistrital.edu.co

⁴ Ingeniero Electricista–Universidad Nacional de Colombia, Magister en Teleinformática–Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Doctor en Ingeniería de Software–Universidad Pontificia de Salamanca – (España), Bogotá D.C., Colombia. Contacto: aespinel@udistrital.edu.co

utilizarlo de manera confiable en un sistema real. El término de topología variable hace referencia a que la instalación de manera dinámica puede cambiar su configuración mediante conmutación de circuitos

para seleccionar una u otra fuente de energía y alimentar la carga de manera más eficiente.

Palabras claves: Instalación eléctrica, Arduino, ADE7763, Topología variable, Medidor de energía.

INTRODUCCIÓN

Actualmente las instalaciones eléctricas en Colombia se componen de una topología estática, lo que significa que no se posee un sistema capaz de cambiar según ciertas condiciones de operación, ni de incorporar nuevas tecnologías relacionadas con las fuentes de energía renovable. Es necesario proponer un sistema para supervisar y controlar los parámetros y elementos dentro de la instalación eléctrica que genere un cambio frente al consumo y el tipo de fuente que se esté empleando; para lo cual es importante conocer en todo momento los principales parámetros eléctricos y a partir de ellos generar procedimientos que permitan una gestión eficiente de la energía residencial, de acuerdo a los lineamientos establecidos en la ley 1715 de mayo de 2014 en Colombia (Colombia, 2014).

Los sistemas de medición de precisión para la obtención de parámetros eléctricos son desarrollados a un alto costo; en este artículo se muestra un prototipo en el que se eligió el integrado desarrollado por Analog Devices (Devices, ADE7763 datasheet) de referencia ADE7763, el cual se adapta a los requerimientos de la instalación eléctrica residencial con topología variable y un alto índice de precisión cumpliendo con las normas IEC1036 y ANSI C12.16 (Smith).

CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

ADE7763: El integrado que se utilizó fue elegido entre diferentes sistemas de medición, como el uso de transformadores, divisores resistivos (OpenEnergyMonitor, s.f.), sensores (Ayari Ahlem, 2014) y

otros medidores de energía como el CS5464 de la empresa CIRRUS LOGIC (Hilwadi Hindersah, 2011); algunos de estos no cumplen con los objetivos que se tienen dentro del desarrollo de la instalación eléctrica de topología variable; sea por razones de costo, de la dificultad de su adquisición, eficiencia, tamaño, complejidad, seguridad y precisión.

Este dispositivo cuenta con un ADCs (convertidor análogo-digital) y un DSP (procesador digital de señales) de función fija de alta precisión en variaciones de tiempo y condiciones ambientales (Devices, Single-phase active and apparent energy metering IC-ADE 7763, Application Note, 2009); incorpora el procesamiento de señal para realizar mediciones de energía activa, aparente y el cálculo RMS (*Root Mean Square* o valor eficaz) de la tensión. El integrador del chip proporciona una interfaz directa con sensores de corriente di/dt, tales como bobinas de Rogowski o sensores de efecto Hall (Gonzalez, 2008), eliminando la necesidad de un integrador analógico externo para estabilidad a largo plazo y adaptación de fase precisa entre la corriente y los canales de tensión.

El ADE7763 proporciona una interfaz de serie para leer los datos y una frecuencia de salida de impulsos (CF) que es proporcional a la potencia activa. Varias características del sistema de calibración como el canal de corrección del offset, calibración de fase y calibración de potencia aseguran una alta precisión; así como también detecta variaciones de alta o baja tensión.

ARDUINO: El dispositivo maestro utilizado para el control y administración de los datos procedentes del medidor de energía es el *Arduino*; este es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno

de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios; fue elegido porque además de tener una fácil implementación, actualmente no tiene un alto costo y permite realizar una comunicación serial (SPI) (Arduino, s.f.) lo cual fue fundamental para la comunicación con el integrado ADE7763

ACS714: El sensor de corriente utilizado es un sensor de efecto hall, el cual consta de un circuito preciso, con un offset de 2.5, con una trayectoria de conducción de cobre ubicado cerca de la superficie del montaje la que hace que a través de este camino se genere un campo magnético que el IC Hall convierte en una tensión proporcional (ALLEGRO); este transductor se utilizó por su fácil implementación rango aceptable y por su tamaño ya que uno de los objetivos es el desarrollo de un sistema de media con un tamaño reducido para realizar la supervisión de cada uno de los circuitos de una instalación eléctrica residencial.

Implementación y operación del sistema de medida (Hardware)

En la *Figura 1 Circuito implementado*. Fuente [Autores, Datasheet ADE7763 (Devices, ADE7763 datasheet)] se observa el circuito implementado

que se fundamenta en las especificaciones del fabricante del integrado (Devices, ADE7763 datasheet) y en el desarrollo propio para el canal de corriente, ya que se usó un sensor de efecto hall de referencia ACS714 (ALLEGRO); este se utilizó por su tamaño comparado con las bobinas de Rogowski o los transformadores de corriente (CT) (Gonzalez, 2008), con el fin de ver hacia el futuro la posibilidad de miniaturizarlo para utilizarlo en medidas individuales de energía para cada circuito de una instalación domiciliaria, de tal forma que permitan conocer el estado de la demanda para conmutar de manera individual a las diferentes fuentes que alimentan la instalación residencial.

El funcionamiento y procesamiento que lleva a cabo tanto el hardware como el software en conjunto, se basa en la obtención y análisis de los datos necesarios para realizar una gestión eficiente de la energía (Colombia, 2014) incluyendo fuentes de energía no convencionales de carácter renovable dentro de la instalación eléctrica residencial; permitiendo que el usuario y/o sistema propuesto sea capaz de hacer una toma de decisiones según ciertas condiciones, incluyendo la oferta y la demanda del recurso energético, dichas decisiones se verán reflejados en cambios directos sobre la topología de la instalación que conlleven a ciertos

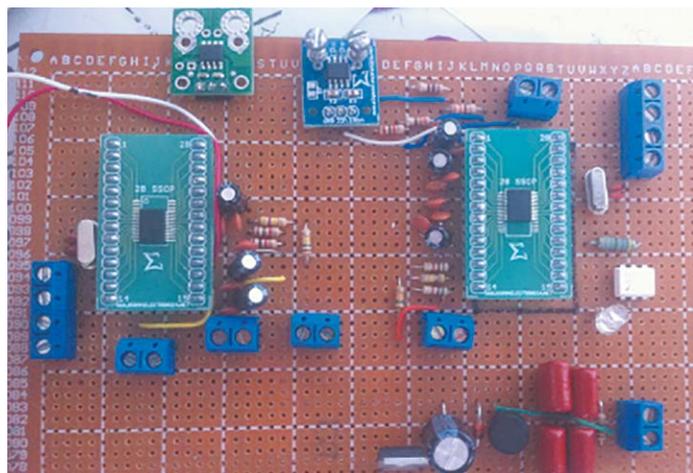
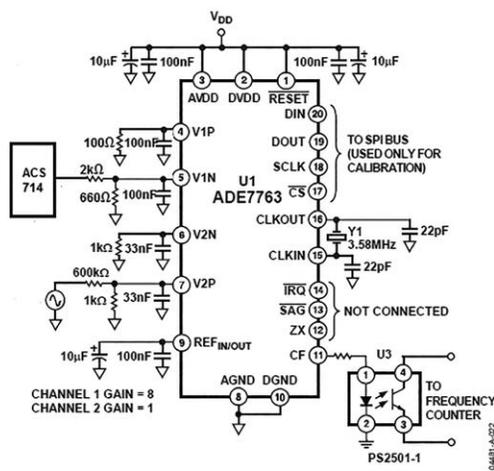


Figura 1: Circuito implementado.

Fuente: Autores, Datasheet ADE7763 (Devices, ADE7763 datasheet)

beneficios en cuanto al ahorro de energía, que estará directamente relacionado con el total facturado de consumo energético por el usuario. En la Figura 2 se presenta resumido el proceso de funcionamiento del trabajo conjunto entre el hardware y el software.

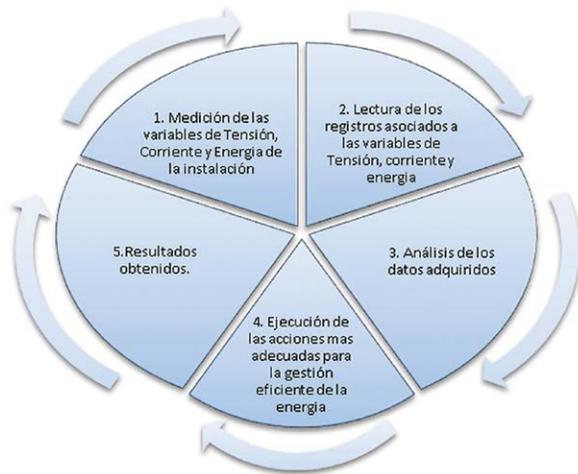


Figura 2 Funcionamiento en conjunto del Software con el Hardware.

Fuente: Autores

PRUEBAS Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA

Para el análisis con el montaje del sistema mostrado, se realizó la implementación de un programa en lenguaje de programación C, el cual se compiló y ejecutó sobre el sistema mostrado, con el fin de realizar las pruebas, para verificar su funcionamiento. La calibración del integrado debe cumplir ciertas condiciones en cuanto a la comunicación serial entre el dispositivo maestro y el esclavo (ADE7763) (Devices, ADE7763 datasheet); mencionando algunas, están los tiempos en bajo de la señal de reloj, tiempos de respuesta del ADE, implementación del modo SPI, entre otros.

La Figura 3, muestra un diagrama de actividades con los pasos más relevantes para la calibración

del medidor de energía, entre los más importantes se encuentran: la comunicación serial y el cumplimiento de los requerimientos necesarios según la hoja de especificaciones del integrado, prueba de lectura y escritura, estipulación de la ganancia a trabajar y la calibración de las variables.

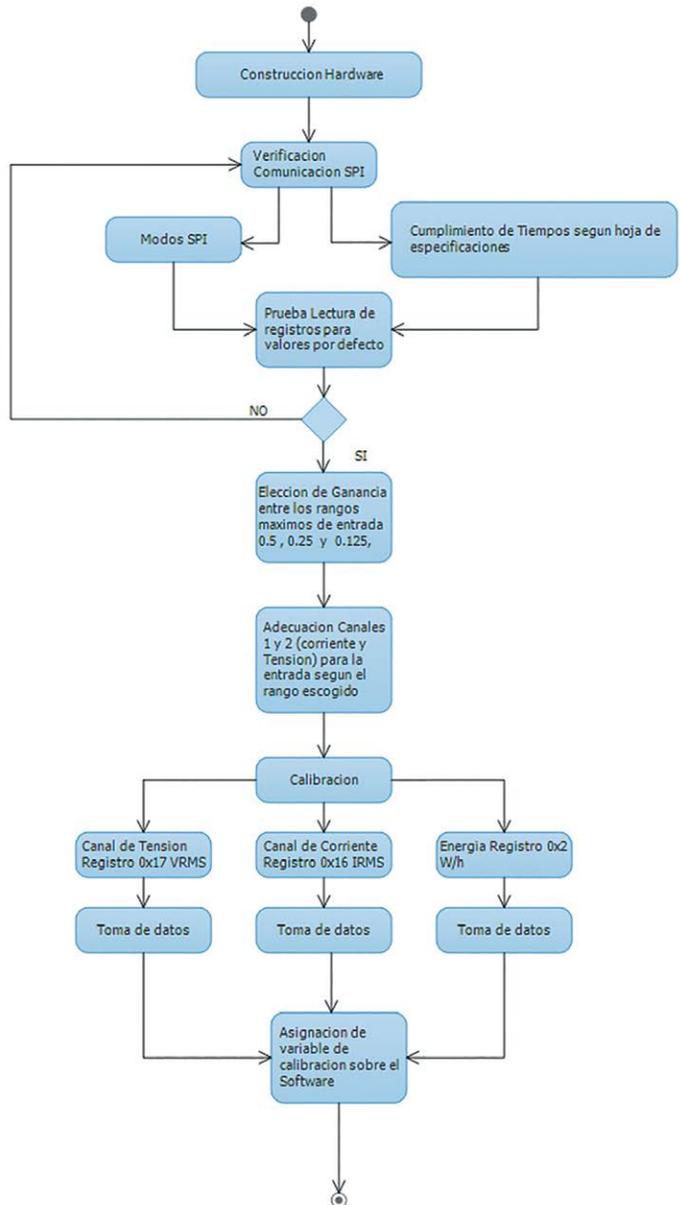


Figura 3 Diagrama de actividades para calibración.

Fuente: Autores

A partir de la calibración se obtiene un medidor de energía con un alto nivel de precisión, la cual se encuentra ligada con los equipos y elementos con los que se realice la implementación del montaje, ya que estos son el punto de referencia del ADE7763 al momento de la medición.

Resultados–Toma de datos

La verificación de la precisión en la toma de datos es importante para el desarrollo del prototipo; para esto, se utilizó como sistema maestro de comunicación el *Arduino* Mega 2560 con sus librerías SPI (Arduino, s.f.), y como fuente un Variac de referencia LEYBOLD (LEYBOLD, s.f.). A continuación se muestra la calibración efectuada de los canales de tensión y corriente.

Canal de Tensión

Se realizó la caracterización del integrado de acuerdo a los datos obtenidos para diferentes niveles de tensión, con estos valores en el software se implementó la ecuación lineal obtenida, y se

efectuó pruebas nuevamente para verificar el error porcentual con respecto al valor real medido con la ayuda de un analizador de redes profesional con los que cuenta el laboratorio de ingeniería eléctrica como lo es el PQA 824 de *HT Instruments*® (Producec) que cumple con normas internacionales entre ellas la EN50160, los resultados de las medidas y la comparación se pueden observar en la Tabla 1.

Se aclara que el rango de medida de tensión del ADE está delimitado por el divisor de tensión que se realizó para garantizar que la señal de entrada del mismo no supere los 0,5 Voltios pico [Vp]; dándose así un nivel máximo de entrada de 150 Voltios RMS (Root Mean Square) [Vrms]. Gracias a esto se pudo obtener un rango de operación para un error mínimo entre 80 y 140 [Vrms], que es lo que se esperaba, ya que la tensión nominal de alimentación para una instalación eléctrica residencial en Colombia es de 120 [Vrms]. La escala manejada en el medidor de energía para tensión está en Voltios RMS [Vrms].

Tabla 1: Caracterización del canal 2 Tensión ADE7763.

Medida de tensión por el PQA824 [Voltios]	Valor del registro de Tensión del ADE7763		Promedio	Tensión de prueba medida por el PQA824 [Voltios]	Voltaje Leído en el <i>Arduino</i> con el ADE7763 calibrado [Voltios]		Promedio [Voltios]	Error%
10.1	361	388	374.5	10.2	12	13	12.5	22.549
20	594	623	608.5	20.5	19	21	20	2.439
30.5	869	901	885	30.4	29	30	29.5	2.96
40.3	1122	1169	1145.5	40.8	39	41	40	1.96
49.9	1381	1428	1404.5	50.3	48	50	49	2.584
60.3	1666	1721	1693.5	60.3	58	60	59	2.155
70.4	1932	1997	1964.5	70.3	68	70	69	1.849
80.5	2226	2283	2254.5	81.3	79	82	80.5	0.984
90.3	2479	2555	2517	90.2	89	91	90	0.221
100.5	2768	2827	2797.5	99.4	98	101	99.5	0.1
110.1	3017	3115	3066	111.8	111	113	112	0.178
120	3297	3393	3345	120.8	119	122	120.5	0.248
130.5	3592	3697	3644.5	130.8	129	133	131	0.152
142	3941	4012	3976.5	142	140	145	142.5	0.352

Fuente: Autores

En la Figura 3 se muestran los valores obtenidos con el ADE7763 sin calibrar mediante la comunicación con el *Arduino* versus el nivel de tensión aplicado, a partir de esto se calibra el integrado y se procede a realizar pruebas presentando un grado de precisión menor al 1% en tensiones entre 80 a 140 [V].

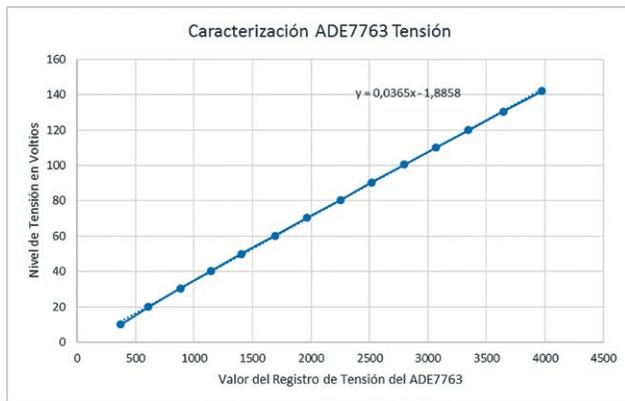


Figura 4: Caracterización de Tensión medida con el ADE7763.

Fuente: Autores.

Canal de Corriente

Para el canal de corriente se utilizó un sensor de efecto hall con sensibilidad de 185mV por amperio de referencia ACS714 (ALLEGRO) y se realizó el mismo procedimiento que con el canal de tensión.

Los datos obtenidos son los que se observan en la Tabla 2, cabe agregar que para el error porcentual determinado en este canal se utilizó un multímetro de precisión RIGOL DM358 (RIGOL, s.f.) como referencia, ya que el PQA 824 que se usó para el canal de tensión nos proporciona una corriente aproximada y no con la resolución necesaria para realizar una correcta comparación con el circuito diseñado.

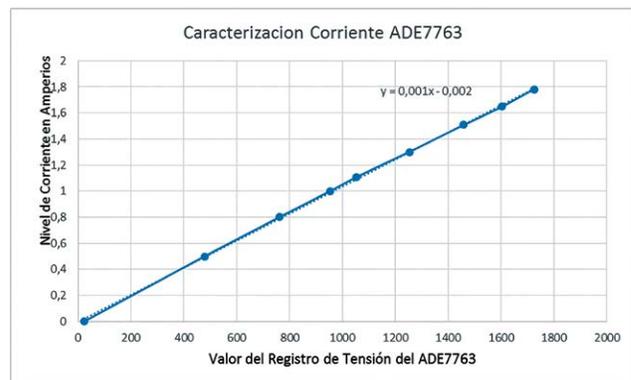


Figura 5: Caracterización de Tensión medida con el ADE7763.

Fuente: Autores

El canal de corriente presenta un grado de precisión de $\pm 2\%$, lo cual es un error aceptable para tener un buen control sobre el circuito que se desea conmutar a una fuente de energía renovable.

Tabla 2: Caracterización del canal 1 corriente ADE7763.

Valor del registro de corriente del ADE7763	Promedio	Corriente Medida por el Multímetro [Amperios]	Corriente Leída en el <i>Arduino</i> con el ADE7763 calibrado [Amperios]	Error%
18	19	18.5	0	0
113	114	113.5	0.14	0
270	271	270.5	0.24	0.833
461	462	461.5	0.48	0.625
681	682	681.5	0.7	1.571
970	972	971	1.03	1.747
1172	1173	1172.5	1.2	1.666
1454	1456	1455	1.49	1.946
1546	1549	1547.5	1.6	2.312
1646	1648	1647	1.69	1.893
1719	1721	1720	1.77	2.033

Fuente: [Autores]

La ecuación de la curva que representa el comportamiento de la calibración y que está en el software es: $Y = 0,001X + 0,0128$

Para el acondicionamiento de la señal de entrada de corriente se implementó un divisor de tensión que garantiza que la entrada en el canal de corriente no superara los 0,5 Voltios pico [Vp] y que el offset del sensor que es de 2.5 Voltios DC [Vdc] no afectara la medida reduciéndolo a 0.6 [Vdc]; como se mencionó anteriormente el ACS714 de 5 [A] tiene una sensibilidad de 185 mV por amperio [A] generando que con este sensor se tenga un rango de operación de 0 a 3,6 Amperios RMS [Arms] aunque cabe resaltar que hay más sensores de esta referencia que pueden ser utilizados con el mismo acondicionamiento de la señal y que tienen una sensibilidad menor como lo es el ACS714 de 20 A[RMS] con una sensibilidad de 60 mV y que unido al ADE tendría un rango de operación de 0 a 11 A[RMS]. La escala manejada en el medidor de energía para corriente está en Amperios RMS A [RMS].

ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

Dentro de los adelantos alcanzados hasta la fecha se ha seguido trabajado en la parte de medición incluyendo además los escenarios de supervisión y control en la instalación, donde además de lograr obtener con el sistema de medición los parámetros

de tensión y corriente también se logró obtener medición de energía activa en kWh lo cual a sido de gran importancia para saber el consumo de las cargas de una instalación.

Seguido de ello se ha trabajado en la parte de conmutación en la que con ayuda del *Arduino* y utilizando un protocolo de comunicación HTTP vía Ethernet se ha logrado por medio de una página web se da la orden de conmutación de una carga resistiva (bombillo) a cualquiera de las dos fuentes, esto se probó con la red y con una batería como fuente de energía alternativa; logrando así una toma de decisiones semiautomáticas. También se esta trabajando en la parte de conmutación automática en la que se programó un botón de la página con dirección IP del *Arduino* para que según los parámetros de tensión si esta ha caído un nivel por debajo de 110 V la conmutación se haga automática a la otra fuente. Actualmente se comenzó a trabajar en la parte de sincronización de las dos fuentes para así poder probar la conmutación con otro tipo de cargas comunes en una instalación eléctrica como lo son un computador, una lavadora, un televisor etc.

Se tiene previsto el poder realizar la implementación de un prototipo funcional del nuevo modelo de instalación eléctrica, con el fin de analizar el comportamiento del mismo en diferentes condiciones de operación, bien sea como auto o

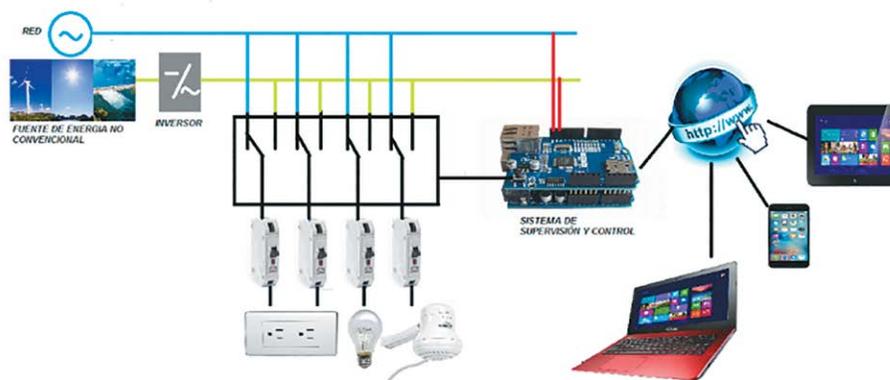


Figura 6. Prototipo de topología dinámica de una instalación eléctrica residencial

Fuente: Autores

cogenerador donde a partir del funcionamiento en conjunto entre el hardware y el software se analizarán CUATRO posibles condiciones de operación basadas en escenarios respectivamente:

- *Condición de operación 1:* Fuente de Energía de la Red Pública, como alimentación de los circuitos de carga conectados y mediante la implementación de protocolos de HTTP y línea de potencia (Power Line Communication) se realizara su respectiva medición y seguimiento.
- *Condición de operación 2:* Fuente(s) de energía renovable con circuitos de carga conectados y mediante la implementación de protocolos de HTTP y línea de potencia (Power Line Communication), se realizara su respectiva medición y seguimiento.
- *Condición de operación 3:* Fuente de Energía de la Red Pública y Fuente(s) de energía renovable alimentando cargas dentro de la instalación utilizando dispositivos electromecánicos y/o de estado sólido para la conmutación de circuitos en los instantes necesarios.
- *Condición de operación 4:* Fuente de energía de corriente directa (DC), con el fin de proporcionarla a las cargas directamente con el uso de inversores de muy baja potencia (microinversores) o si es posible hasta sin el uso de los mismos; disminuyendo así pérdidas y aumentando la eficiencia.

Agradecimientos: Se expresan sinceros agradecimientos al Grupo de Investigación GESETIC, asociado al proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica y al personal de los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por su valiosa colaboración para la realización de las pruebas mencionadas.

CONCLUSIONES

Dentro del desarrollo de la calibración se utilizaron dos (2) integrados de las mismas especificaciones

de los cuales se pudo observar que el comportamiento de cada uno es diferente; por lo que se concluyó que siempre se debe efectuar calibración para cualquier sistema de medida que utilice el ADE7763. Esto quiere decir que para una aplicación comercial de este dispositivo se debe contar con un sistema de calibración para cada componente que se fabrique. Esta calibración se hace ajustado el algoritmo en software.

- En la medición de tensión se concluyó que rangos menores a 20V no son leídos por el integrado de manera adecuada, esto se debe a que la ganancia que se toma es por defecto; para el rango hasta 0.5V los valores de tensión pequeños tienen un error mayor, situación no preocupante ya que en una instalación eléctrica residencial los valores de tensión están alrededor de 120V, y para el sistema probado presenta un error de 0.22%, que es aceptable por las normas. Para la medición de corriente se tienen errores cercanos al +/- 2%, sin embargo se observa que para la medida de corrientes pequeñas, el sistema es bastante preciso, razón que lo hace confiable para medir circuitos de alumbrado especialmente con bombillos economizadores de energía o de tipo LED, que serían los circuitos elegibles para conmutar a las fuentes de energía renovable.
- El error porcentual determinado para el sistema de medición tiene mejores respuestas para la medida de voltaje, toda vez que la señal se toma de manera directa a través de divisores resistivos, dando resultados cercanos al 0,2% lo que quiere decir que según norma ANSI C12.20 la clase de precisión para este sistema de medición es clase 0.2; en tanto que para la medida de corriente los resultados son cercanos al 2%, por lo que requiere realizar ajustes en el algoritmo de muestreo y cuantificación de la señal tomada, que serán motivo para la continuación de la presente investigación, hasta obtener la conformidad con las normas para solicitar la homologación de este sistema de medida.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar sus agradecimientos al grupo de investigación Gestión de Sistemas de Información con Tecnologías de Información y Comunicaciones –GESETIC, por haber hecho posible este estudio.

FINANCIAMIENTO:

Universidad Distrital Francisco José de caldas

REFERENCIAS

ALLEGRO. (s.f.). *ACS714 Datasheet*.

Arduino. (s.f.). *Arduino SPI*. Recuperado el 1 de Julio de 2015, de <https://www.arduino.cc/en/reference/SPI>

Ayari Ahlem, M. H. (2014). Design and implementation of Single Phase Intelligent Energy Meter using a microcontroller interfaced to PC. *IEEE*, 5.

Calegari, F. (2005). Electric Power/Energy Measurements for Residential Single-Phase Networks. *IEEE*, 6.

Colombia, C. d. (13 de Mayo de 2014). Ley 1715. *Por medio de la cual se regulala integracion de las energias renovables no convencionales al sistema electrico nacional*. Colombia.

Devices, A. (2009). *Single-phase active and apparent energy metering IC-ADE 7763, Application Note*.

Devices, A. (s.f.). *ADE7763 datsheet*.

Gonzalez, G. E. (2008). *Diseño y construccion de un sistema integrado de medicion de energia monofásica de uso residencial*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.

Hilwadi Hindersah, A. P. (2011). Prototype Development of Single Phase Prepaid kWh Meter . *IEEE*, 6.

LEYBOLD. (s.f.). *LEYBOLD Didactic Documents*. Recuperado el 10 de 07 de 15, de <http://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/5/521/52140de.pdf>

OpenEnergyMonitor. (s.f.). *Measuring AC Voltage with an AC to AC power adapter*. Recuperado el 15 de 9 de 2014, de <http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter>

Producec. (s.f.). *Producec -PQA 824*. Recuperado el 5 de 7 de 2015, de <http://producec.com.co/Docs/PQA823%20-%20PQA824.pdf>

questnet101. (s.f.). *questnet101*. Recuperado el 22 de 10 de 2015, de <http://www.questnet101.com/wp-content/uploads/2015/04/Quest-Internet-101.jpg>

RIGOL. (s.f.). *Digital Multimeters Introduction*. (RIGOL) Recuperado el 5 de 7 de 2015, de <http://www.rigol.com/prodserv/Digital%20Multimeters/>

Smith, S. E. (s.f.). *AN-564 APPLICATION NOTES. ANALOG DEVICES*.

