

# Sistema electrónico para la adquisición, procesamiento y comunicación de las señales eléctricas para el uso en redes inteligentes (Smart Grids)

**Electronic System for acquisition, processing and communication of the electrical signals for use in Smart Grids**

Recibido: diciembre 10 de 2012  
Aprobado: diciembre 14 de 2012

Carlos I. Camargo B.\* , M. Asprilla\* , Nelson F. Rosas\*\*\*

## Resumen

La medición de energía de forma remota es un proceso importante para muchas empresas que comercializan el servicio. En la actualidad, los sistemas de distribución se están convirtiendo en plataformas inteligentes que son capaces de comunicarse de forma bidireccional con los usuarios utilizando diversos medios [1], permitiendo reducir de forma considerable la lectura de la medición, el reporte de fallas y el cambio de topología de la red. En países en vías de desarrollo como Colombia proporcionan servicios adicionales que ayudan a detectar el robo de energía.

---

\* Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia. Magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia. Doctor en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. E-mail: cicamargoba@unal.edu.co

\*\* Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Electrónica y de Computadores, Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia. E-mail: amasprillav@unal.edu.co

\*\*\* Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia. Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia. Profesor Asociado, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Facultad de Ingeniería, Director de Ingeniería Electrónica y de Ingeniería de Telecomunicaciones. E-mail: neferoji@gmail.com, nfrasasj@unal.edu.co

Este trabajo es producto de la aplicación de una metodología de transferencia tecnológica en el área de diseño de sistemas digitales [2]. Para su desarrollo se tomaron como punto de partida las plataformas *hardware copyleft* [3] distribuidas por la comunidad *linuxenaja* bajo la licencia Creative Commons CC-BY-SA, las cuales permiten utilizar y modificar los diseños, incluso para fines comerciales, con el requisito de publicar los trabajos derivados bajo la misma licencia.

Se diseñaron y construyeron dos dispositivos de medida que utilizan diferentes arquitecturas: la primera se basa en un circuito integrado de aplicación específica (ASIC), el cual integra los circuitos de adecuación de señales y procesamiento. La segunda usa componentes discretos para adecuar la señal y utiliza un procesador dedicado para realizar los cálculos. Estas dos etapas fueron implementadas y comparadas con el fin de determinar ventajas y desventajas de sus arquitecturas. Adicionalmente, se realizaron los algoritmos necesarios para cumplir con las normas técnicas IEC 61000 4-7 y 4-30, y los estándares de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

### **Palabras clave**

Medición de energía, calidad de energía, sistemas embebidos y GNU/Linux.

### **Abstract**

The remote energy measurement is an important process for a lot of service commercialization companies. Now the distribution systems are becoming in intelligent platforms that communicates in a bidirectional way with the users using different protocols [1], that reduces the measurement errors, reports the failures and changes of the topology of the network. In some developing countries like Colombia, the system can provide more services that helps to detect the stole of energy.

This work is a product of the application of a technology transfer in the digital systems design[2]; for the realization, *hardware copyleft* platforms were used as an starting point. [3] Distributed by the *linuxenaja* community with the Creative Commons license (CC-BY-SA) that lets use and modify the design for commercial proposes with the requisite of publish the derivated works with the same license.

Two measurement devices were designed and built that uses different architectures: the first is based in Application specific integrated circuit (ASIC); the second uses discrete components for adequation of the signals and uses a dedicated processor for the data processing. That stages were implemented and compared to determine advantages and disadvantages of the architectures; additionally, the necessary algorithms were developed to comply the IEC 61000 4-7 and 4-30 and CREG standards.

### **Keywords**

Energy Measurement, Energy Quality, Embedded Systems and GNU/Linux.

## I. Introducción

El sistema de adquisición, procesamiento y comunicación de información de señales eléctricas para uso en *Smart Grids*, hace parte del proyecto de investigación del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Esta investigación tiene como área de estudio el diseño digital y para su elaboración se utilizaron herramientas de *software* y *hardware* libre. El objetivo principal es crear dispositivos que procesen y entreguen información relacionada con el consumo energético y calidad de energía para el uso en *Smart Grids*. Como parte del análisis, se diseñaron dos arquitecturas de adquisición de señales de tensión y corriente, implementadas en la plataforma de desarrollo *hardware copyleft* STAMP como unidad de procesamiento y de comunicaciones.

La plataforma STAMP posee un coprocesador encargado de las operaciones de punto flotante (FPU), lo que permite realizar los cálculos en tiempo real. Ambas plataformas reportan, vía web, al centro de control los valores de tensión, corriente, potencia, factor de potencia, consumo energético, armónicos de tensión, corriente por fase, y algunos eventos como *sags*, *swells* e interrupciones.

## II. Descripción de las arquitecturas de medición

En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques del sistema de medición implementado, el cual está compuesto por la etapa de acondicionamiento de señales, la conversión análogo-digital, la unidad de procesamiento y el sistema de comunicaciones.

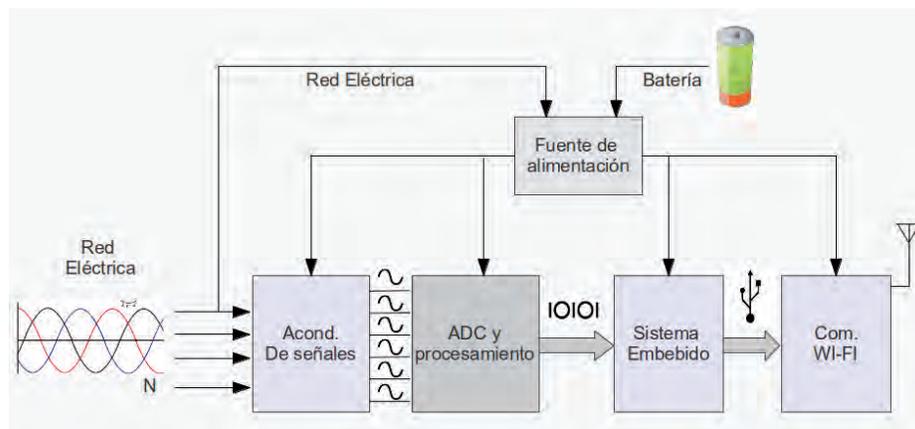


Figura 1: Diagrama de bloques general del sistema.

### A. Etapa de acondicionamiento de señales

Este módulo es el encargado de ajustar las señales de tensión y de corriente de la red eléctrica a niveles que puedan ser utilizados por el circuito de conversión, muestreo y procesamiento de datos. Básicamente, se les adiciona un valor DC para que la señal de entrada sea de tipo unipolar y convertible en valores discretos. Para el censado de tensiones se

utilizan resistencias de precisión y en las entradas de corriente se utilizan transformadores de corriente, seguidos de una resistencia de derivación, en la cual aparecerá una tensión proporcional a la corriente que fluye por la carga.

En la primera arquitectura de adquisición de datos propuesta se utilizó el ASIC MAXQ3183. Este circuito integrado permite la adecuación de la señal de voltaje, utilizando un divisor resistivo, (ver Figura 2) y la medición de la señal de corriente directamente de la salida de un transformador de corriente (ver Figura 3).

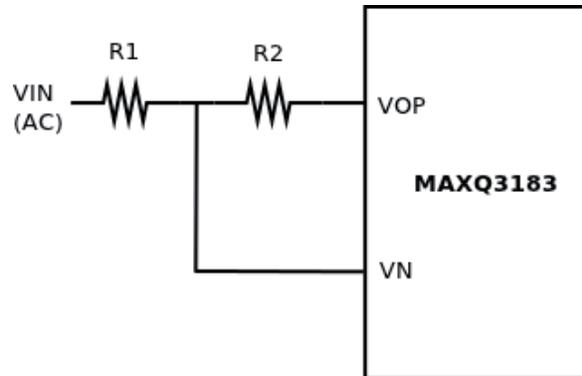


Figura 2: Circuito de adquisición de señales de tensión para el MAXQ3183. Fuente: [4].

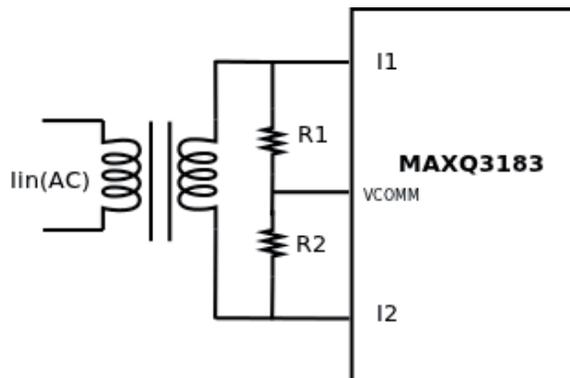


Figura 3: Circuito de Adquisición de señales de corriente para el MAXQ3183. Fuente: [4].

En la segunda arquitectura propuesta, se realiza la etapa de adquisición de datos atenuando las señales de tensión con un divisor resistivo, la salida se conecta a un amplificador operacional para proporcionar un aislamiento galvánico al circuito. También, se separa el neutro de las señales trifásicas y la tierra del circuito analógico de medición.

Después de aislar el neutro de las señales analógicas, las señales ingresan a un filtro *anti-aliasing* con frecuencia de corte igual a la frecuencia de Nyquist. Esto se realiza para dar cumplimiento a las normas IEC 61000 4-30, la cual establece la utilización de filtros para evitar errores en el procesamiento de las señales [5]. Después, se adiciona un valor DC para eliminar el semiciclo negativo, y de esta forma, entrar por los conversores analógicos-digitales. El diagrama de bloques del circuito de adquisición de señales de tensión se presenta en la Figura 4.

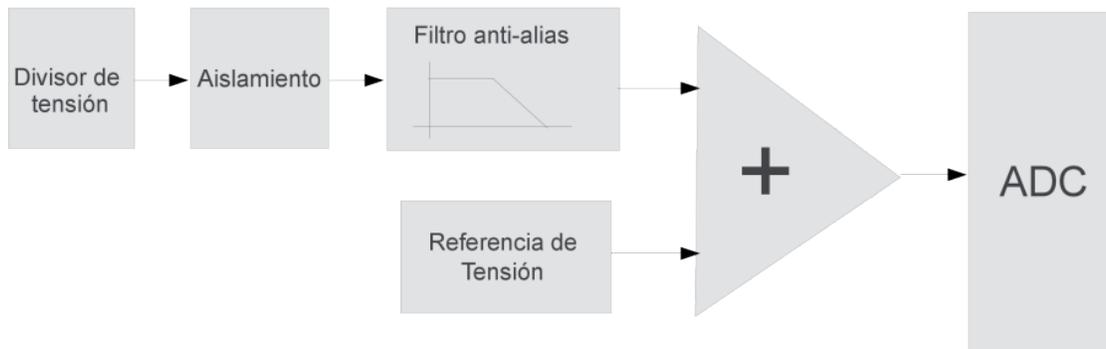


Figura 4: Diagrama de bloques del circuito de adquisición de señales de tensión.

El circuito de adecuación para las señales de corriente es similar al presentado en la figura 4, teniendo como diferencia el aislamiento galvánico, realizado con el transformador de corriente. Al transformador de corriente se conecta una resistencia shunt entre sus terminales para así poder obtener una tensión proporcional a la corriente, a la relación de transformación y al valor de dicha resistencia. En la figura 5 se presenta el diagrama de bloques del circuito de acondicionamiento de señal utilizado para adquirir las señales de corriente.

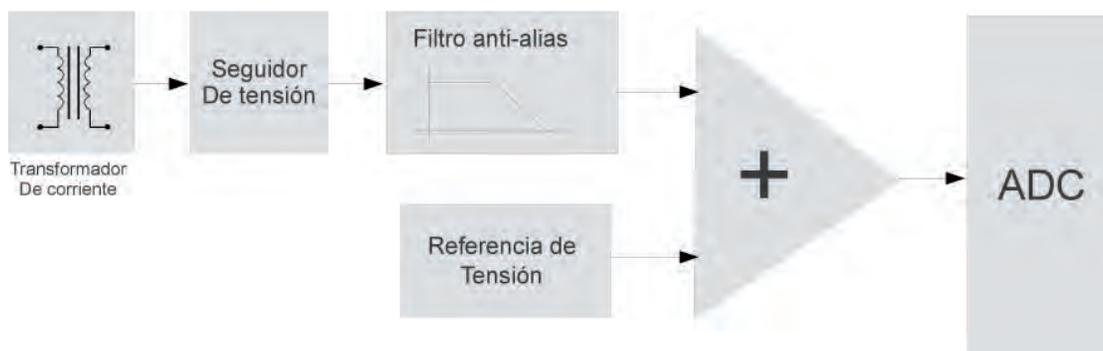


Figura 5: Diagrama de bloques del circuito de adquisición de señales de corriente.

## B. Fuente de alimentación

Esta etapa es la encargada de generar los voltajes necesarios para el correcto funcionamiento de todos los módulos y obteniendo la alimentación de la red eléctrica o de una batería, proporcionando un funcionamiento ininterrumpido, aun ante el evento de falla en el suministro de la red de energía eléctrica, permitiendo al dispositivo informar sobre eventos de cortes de energía.

## C. Etapa de muestreo y procesamiento de señales analógicas

En la etapa de muestreo y procesamiento se utilizó la tarjeta *hardware copyleft* STAMP; la cual posee un procesador ARM 926 de 450MHz y cuenta con un coprocesador cortex M4 con unidad de punto flotante. En la figura 6 se muestra una imagen de la plataforma.

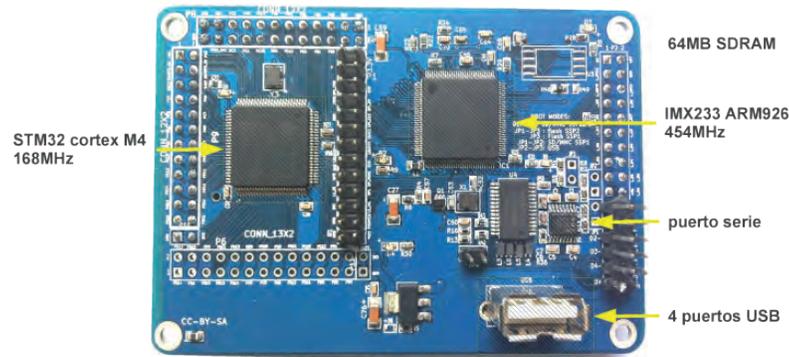


Figura 6: Tarjeta de desarrollo i.MX233 STAMP con procesador STM32F407.

El ASIC de MAXIM posee un convertor análogo-digital interno que puede muestrear 8 canales diferentes: 3 de tensiones, 3 de corrientes de fase, corriente de neutro y temperatura del chip, y un DSP que realiza el procesamiento de la señal y se comunica con un microcontrolador por medio del protocolo SPI. Este realiza los cálculos de las mediciones en intervalos llamados ciclos de DSP. En cada intervalo se calculan los valores RMS, potencia, factor de potencia, consumo de energía y se determinan los parámetros de calidad como *dips* y *swells* (sus umbrales se configuran como parámetros de operación del circuito integrado). Adicionalmente, el ASIC posee registros en su memoria interna en donde se almacenan los parámetros de funcionamiento y los resultados de las mediciones, los cuales serán transferidos al sistema embebido utilizando el protocolo SPI con acceso directo a memoria (DMA), lo que permite una comunicación más eficiente en la que se interrumpe al procesador cuando la totalidad de los datos son adquiridos.

Para utilizar este periférico se desarrolló un driver para Linux con el que se pudiera acceder a él desde espacio de usuario<sup>1</sup>. Para realizar el reporte de datos de señales eléctricas, se crearon los algoritmos de lectura y escritura al circuito integrado, de esta manera se pueden leer todos los registros del chip y obtener los valores para ser visualizados.

En la segunda arquitectura de medición, la tarjeta STAMP es la encargada de realizar el procesamiento en tiempo real de los datos utilizando el coprocesador cortex M4; el cual posee un convertor analógico-digital de 12 bits y muestrea a 7860Hz; el ADC tiene soporte para modo DMA con lo que se asegura que se generen interrupciones cada vez que se tenga un *buffer* de datos lleno y listo para ser procesado; cuando se genera la interrupción se realizan los cálculos necesarios para cumplir las normas nacionales o internacionales.

Adicionalmente, se adicionaron algoritmos en las dos arquitecturas que contrastan la información de los medidores de los usuarios con la energía entregada por el transformador y de esta forma detectar robo de energía. Informan a los usuarios el consumo en pesos y no en kilo-watts/hora, y a la empresa de energía las fallas en el suministro y la calidad del mismo.

<sup>1</sup> El espacio de usuario es una capa del kernel de Linux con la que se acceden a las aplicaciones del kernel, no accede directamente al hardware.

#### D. Etapa de visualización de la información medida

Los datos y cálculos de los parámetros de interés son transferidos desde el coprocesador al procesador en donde son procesados nuevamente para ser transmitidos vía internet. Cada tres segundos el procesador genera un archivo en formato JSON[6]<sup>2</sup>, en el cual se almacenan los datos medidos y calculados, para dar cumplimiento a la norma IEC [5]. Esto se realiza con las dos arquitecturas de medición de energía. En el procesador se ejecuta el sistema operativo Linux, y sobre él, un servidor de páginas WEB, el cual aloja la información capturada en las tramas JSON, para su presentación en diferentes gráficas y tablas, la información relacionada al consumo energético y calidad de energía de cada fase.

#### E. Etapa de comunicación de datos

La plataforma de desarrollo STAMP posee cuatro puertos USB, en uno de ellos se conecta el módulo de comunicación inalámbrica WiFi, proporcionando conectividad vía internet. Esto se puede realizar gracias al soporte que tiene Linux para los protocolos de red existentes y la configuración de las redes inalámbricas, por ejemplo: 3G, 4G, GPRS, WiMAX.

### III. Prototipos

Como se mencionó anteriormente, este trabajo es el resultado de la aplicación de una metodología para la transferencia tecnológica y de conocimientos en el área de diseño digital, uno de los pasos de esta metodología es la implementación de los sistemas digitales con el fin de ser comercializados. Para cumplir con este paso se implementaron prototipos de las dos arquitecturas propuestas, es importante mencionar que el uso de la plataforma de desarrollo *hardware copyleft* STAMP ahorró mucho tiempo en el diseño de estos prototipos, porque no fue necesario diseñar una plataforma estable en la que se ejecutara Linux, ni fue necesario crear el *software* básico para su correcto funcionamiento; el tiempo ahorrado se estima en alrededor de 18 meses. Estos prototipos fueron utilizados para realizar las pruebas de funcionamiento y para la detección y corrección de errores.

#### A. Arquitectura MAXQ3183

En la figura 7 se muestra el prototipo del medidor basado en el ASIC MAXQ3183, en la cual podemos observar la ubicación de los diferentes módulos o componentes. Para facilidad de mantenimiento, los dispositivos se dividieron en tres tarjetas: la unidad de procesamiento, compuesta por el procesador y coprocesador; la unidad de acondicionamiento de señales y la etapa de adquisición, en la cual se encuentran los sensores de corriente y los divisores de voltaje. En esta última etapa se producen la mayor parte de los daños, porque se manejan altas corrientes y voltajes, por esta razón, se decidió utilizar un circuito independiente para su implementación.

---

<sup>2</sup> JSON es un formato de texto plano que organiza la información para poder ser leída por la librería *flot*, distribuida de forma libre y se ejecuta utilizando el lenguaje Java Script [8].



Figura 7: Sistema de medición de energía utilizando el ASIC MAXQ3183.

### B. Arquitectura de medición utilizando acondicionamiento de señales

En la figura 8 se muestra la tarjeta del medidor que funciona con acondicionamiento de señal y muestreo de señales discretas. Se presenta la división de circuitos que se realizó en la arquitectura anterior, con el objetivo de brindar flexibilidad y facilitar el mantenimiento.



Figura 8: Sistema de medición de energía utilizando la arquitectura de tratamiento de señales discretas.

## IV. Pruebas y resultados

### A. Arquitectura MAXQ3183

Para realizar las pruebas de estos sistemas electrónicos se implementó un circuito trifásico para medir los parámetros por cada fase. En una de las fases se conectó un bombillo ahorrador de energía, el cual presenta un alto nivel de distorsión en la forma de onda de la corriente, con el que se puede verificar el correcto funcionamiento de los algoritmos de cálculo de armónicos.

Los resultados obtenidos se compararon y calibraron contra el analizador de redes Fluke 43B, generando rutinas de calibración automática, necesarias para producción en escala. Estas pruebas permitieron establecer que el dispositivo presentara una precisión del 1% en voltaje y del 2% en corriente.

Uno de los inconvenientes de trabajar con el ASIC de MAXIM corresponde al tiempo necesario para realizar las mediciones de los armónicos, porque demora alrededor de 1

segundo para el procesamiento de cada uno, representado un tiempo total de 2 minutos para reportar todos los armónicos tanto de tensión como de corriente de cada fase. Esto, se debe al uso de filtros digitales con un ancho de banda cercano a 1 Hz. Adicionalmente, se encontró que la relación señal-ruido de la captura de armónicos es alta pero se puede disminuir si se aumenta el tiempo de cálculo de armónicos [7].

## B. Arquitectura de medición utilizando acondicionamiento de señales

Utilizando el mismo circuito de prueba que en el caso anterior, se estableció que el dispositivo tiene una desviación del 4% en la señal de voltaje y del 3% para la corriente. Estos errores pueden ser reducidos vía *software* utilizando rutinas de calibración, con lo que el dispositivo de medida puede lograr diferentes grados de precisión. En la figura 9 se muestra la interfaz gráfica de la página Web de los dos dispositivos.

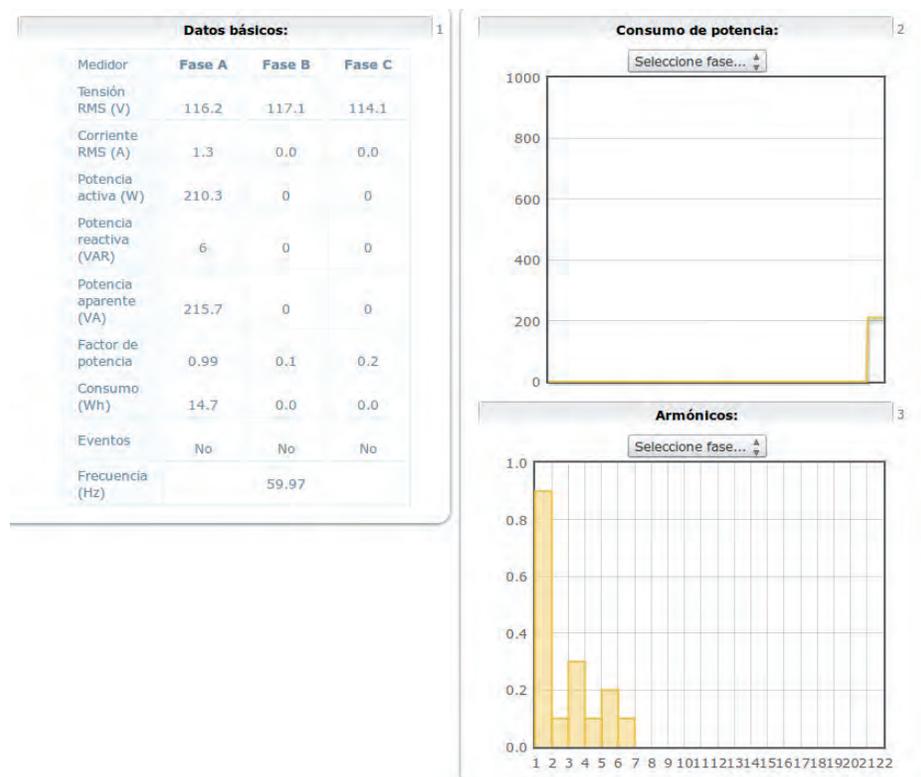


Figura 9: Interfaz gráfica de la página Web con el reporte de información para las dos arquitecturas.

## V. Conclusiones

- El uso de plataformas de desarrollo *hardware copy/left* permite un ahorro significativo de tiempo y dinero en el desarrollo de nuevos productos.
- Es posible diseñar en Colombia dispositivos digitales que utilicen tecnología de punta para dar solución a problemas locales que son resueltos de forma parcial con productos diseñados para otros entornos sociales.

- Los dispositivos desarrollados pueden detectar y reportar en tiempo real eventos relacionados con la calidad del servicio, ayudado en la detección de robo de energía.
- El integrado MAXQ3183, a pesar de ser un circuito especializado en medición de energía, no realiza algunos cálculos exigidos por las normas; sin embargo, se puede utilizar en aplicaciones en las cuales no sea necesaria la rápida actualización de la información. Adicionalmente, este circuito reduce de forma considerable el costo de componentes y simplifica el diseño de la placa base.
- Gracias al sistema operativo Linux, se puede acceder a herramientas y protocolos utilizados para comunicaciones seguras, permitiendo utilizar protocolos de comunicación útiles en la implementación de *Smart Grids*.

## Referencias

- [1] E. Rodríguez, A. Calderón, D. Méndez y C. Camargo. *Sistema Integrado de medición de energía, Calidad del servicio y operación remota*. Memorias de la VI Jornada de Distribución de Energía Eléctrica - ASOCODIS, Bogotá, 2009.
- [2] C. Camargo. *Metodología para la transferencia tecnológica en la industria electrónica basada en software libre y hardware copyleft*. Congreso Argentino de Sistemas Embebidos CASE 2012, Buenos Aires Argentina, 2012.
- [3] C. Camargo. *Hardware copyleft como Herramienta para la enseñanza de sistemas embebidos*. Congreso Argentino de Sistemas Embebidos CASE 2011, Buenos Aires, Argentina, 2011.
- [4] MAXIM Integrated Semiconductor, Low-Power, Multifunction, Polyphase AFE with Harmonics and Tamper Detect, MAXQ3183 Datasheet.
- [5] International Electrotechnical Commission, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods - First Edition, 2002.
- [6] JSON (Java Script Object Notation). Disponible en: <http://www.json.org/>
- [7] Weiqing Tao, Two methods realization of harmonic measurement based on MAXQ3180 for grid, Industrial and Information Systems (IIS), 2nd. International Conference, 2010.
- [8] flot - Attractive Javascript plotting for jQuery <http://code.google.com/p/flot/>



The image shows the cover of the journal 'INGENIUM'. On the left is the circular seal of the University of San Buenaventura, featuring a figure and the text 'SIGILLUM UNIVERSITATIS SANCTI BONAVENTURAE 1708'. Below the seal is the text 'UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA BOGOTÁ'. The main title 'INGENIUM' is written in large, stylized, orange-outlined letters with a blue gradient. Below it, in smaller black letters, is 'REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA'. At the bottom, the word 'SUSCRÍBASE' is written in large, white, bold letters. The background is a blue grid pattern.