

Medidor Inteligente de Energía

Marcos E. Postemsky, Sergio F. Hernández Velázquez,

Roberto M. Murdocca, Andrés M. Airabella

Área de Electrónica,

Facultad de Ciencias Físico, Matemáticas y Naturales, Universidad Nacional de San Luis

y Laboratorio de Electrónica, Investigación y Servicios

San Luis, Argentina

marcos.postemsky@gmail.com, {sfhernandez, amairabe, mmurdocc}@unsl.edu.ar

Resumen— El objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de medición de energía bidireccional inteligente. La información del medidor puede ser visualizada de dos maneras diferentes: la primera es a través de un display de cristal líquido y la segunda por medio de una aplicación instalada en dispositivos con sistema operativo Android. Se utilizó el estándar de comunicaciones Bluetooth para transmitir los datos desde el medidor al dispositivo Android.

Palabras Claves – Acondicionamiento de señal, Bluetooth, Medidor inteligente, Microcontrolador.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes inteligentes (Smart Grids) son el nuevo modo de gestionar el flujo de energía eléctrica. Sus alternativas flexibles relacionan la generación con la demanda y permiten un aprovechamiento integral de las instalaciones y los recursos [1], [2].

En toda red donde haya generadores y consumidores, resulta indispensable medir los flujos de energía para luego cobrar las tarifas pactadas. Los medidores de energía han evolucionado desde el contador electromecánico hasta los actuales medidores digitales. En [3] se presenta una clasificación de los medidores, abarcando desde el medidor electromecánico hasta el Medidor Inteligente (MI, o SM por Smart Meter).

Los MI pueden formar parte de una Smart Grid y es mediante estos que se cuantifica y transmite instantáneamente la información sobre las cantidades de energía consumidas o producidas para su gestión en la red eléctrica. Estos medidores presentan en la mayoría de los casos, funcionalidades cuyas capacidades de análisis superan la lectura de energía con propósitos de facturación [4]. Algunas de estas características extendidas de los MI son:

- Mantener informado al consumidor o productor de energía de los valores de energía.
- Cuantificar instantáneamente el estado de la red de distribución del lado del consumidor.
- Mantener registro del consumo neto y discriminador (consumo vs. generación) del usuario.
- Integración de la vivienda al edificio (Vivienda Inteligente/Edificio Inteligente)

- Alarmas y control de calidad de energía producida/consumida.

Parte de la inteligencia del medidor consiste en poder conectarse a una red de datos, ya sea privada (del usuario, o el distribuidor) o pública (internet) para intercambiar información entre los distintos actores de la red eléctrica [5]. Esta característica extiende todavía más las posibles aplicaciones de los MI, permitiendo analizar los datos generados por el mismo de manera externa, con programas externos en dispositivos portátiles, en computadoras o en plataformas integradas en internet (big data, cloud computing) [6].

El presente trabajo consiste en el diseño e implementación de un sistema de medición de energía bidireccional inteligente (Fig. 1). Bidireccional significa que el medidor, puede registrar tanto la energía consumida por el usuario desde la red de distribución, así como también la energía excedente generada por este y devuelta a la red.

Además de medir la energía consumida, el sistema cuenta con comunicación Bluetooth, por lo cual se desarrolló una interfaz para Android. Dicha interfaz le permite al usuario conocer el consumo total en kWh o Wh, el consumo mensual, la corriente entregada por la red o la corriente entregada a la red y el factor de potencia. A su vez permite también configurar rangos de aviso de sobretensión, sub-tensión y sobre-consumo.

El hardware del sistema, está compuesto por bloques de medición, un display de cristal líquido (LCD) y un pulsador, con

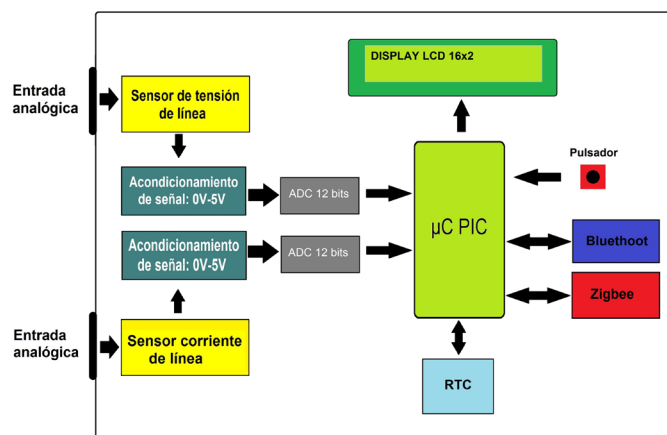


Fig. 1 Implementación general.

los cuales se puede acceder a la información del medidor a través de un menú.

Este trabajo fue realizado en el marco del “Programa Universidad Diseño y Desarrollo Productivo”, cuyo nombre de proyecto es D9-UNSL3160 Medidor Inteligente de Energía.

El trabajo está organizado de la siguiente forma: en la Sec. 2 se presenta el acondicionamiento y muestreo, en la Sec. 3 se explica el funcionamiento del firmware, en la Sec. 4 se muestra la aplicación Android y en la Sec. 5 se detallan los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sec. 6 se presentan las conclusiones y en la Sec. 7 se proponen trabajos futuros.

II. ACONDICIONAMIENTO Y MUESTREO

El Medidor Inteligente cuenta con dos etapas de acondicionamiento de señal: una de tensión y otra de corriente. En los siguientes apartados se explica cómo fueron implementadas.

A. Acondicionamiento de Tensión

Para acondicionar la tensión de línea de 220 V de corriente alterna (CA) al rango de entrada del conversor analógico digital (ADC), se utiliza un amplificador de aislamiento y un divisor resistivo. Dicho amplificador es el AMC1200B fabricado por Texas Instruments [7].

El AMC1200B es un amplificador de aislamiento de precisión con una salida separada del circuito de entrada por una barrera de dióxido de silicio (SiO_2) que es altamente resistente a la interferencia magnética. Esta barrera está certificada para proporcionar aislamiento galvánico de hasta 4250 V_{PICO}. Si el integrado es usado en conjunto con fuentes de alimentación aisladas se evita que el ruido de una línea de alta tensión de modo común entre en la tierra local e interfieran y dañen circuitos delicados. La entrada del amplificador está optimizada para la conexión directa a una resistencia shunt u otra fuente de señal de baja tensión. Dicha señal de entrada debe ser como máximo de 250 mV. Además, cuenta con un modulador de entrada Sigma-Delta de segundo orden incluyendo una tensión de referencia y un generador de reloj. La salida del modulador y la señal de reloj

se transmiten diferencialmente a través de la barrera capacitiva integrada que separa las etapas de alta y baja tensión. La trama de bits recibida y la señal de reloj son sincronizadas y procesadas por un filtro analógico de tercer orden con una ganancia nominal de 8 del lado de baja tensión y es presentada como una salida diferencial del dispositivo (VOUTP y VOUTN). La tensión de modo común de la señal de salida es ajustado automáticamente ya sea para 3.3 V o 5 V dependiendo de la tensión de alimentación (Fig. 2).

Para medir tensión se utilizó el circuito recomendado por el fabricante (Fig. 3). La señal de entrada diferencial es filtrada usando filtros RC (componentes R4, R7 y C6). Los capacitores C8 y C11 se usan para reducir la carga desde las entradas. En este diseño, se debe tener sumo cuidado al elegir la calidad de los capacitores; el desajuste en los valores de estos conduce a un error de modo común en la entrada del modulador. Dada la baja calidad de los capacitores utilizados en el primer prototipo, se tuvo en cuenta este fenómeno a la hora de analizar los errores. En el circuito utilizado se tiene el ADC externo con entrada diferencial [8].

B. Acondicionamiento de corriente

En esta etapa (Fig. 4) se utilizó el transductor LEM LTS15-NP [8], [9] (Fig. 5). El mismo permite realizar la medición de corrientes: continua, alterna, pulsante, o mixta; con aislamiento galvánico entre el circuito primario (alta potencia) y el circuito secundario (circuito electrónico). El rango de medición es de 48 A, con una sensibilidad de 41.6 mV/A, soportando corrientes hasta 250 A. La tensión de salida se comporta como se muestra en la Tabla I.

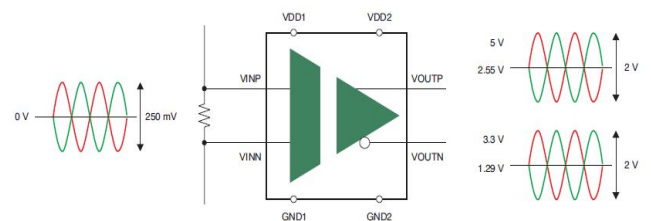


Fig. 2. Esquema simplificado del AMC1200.

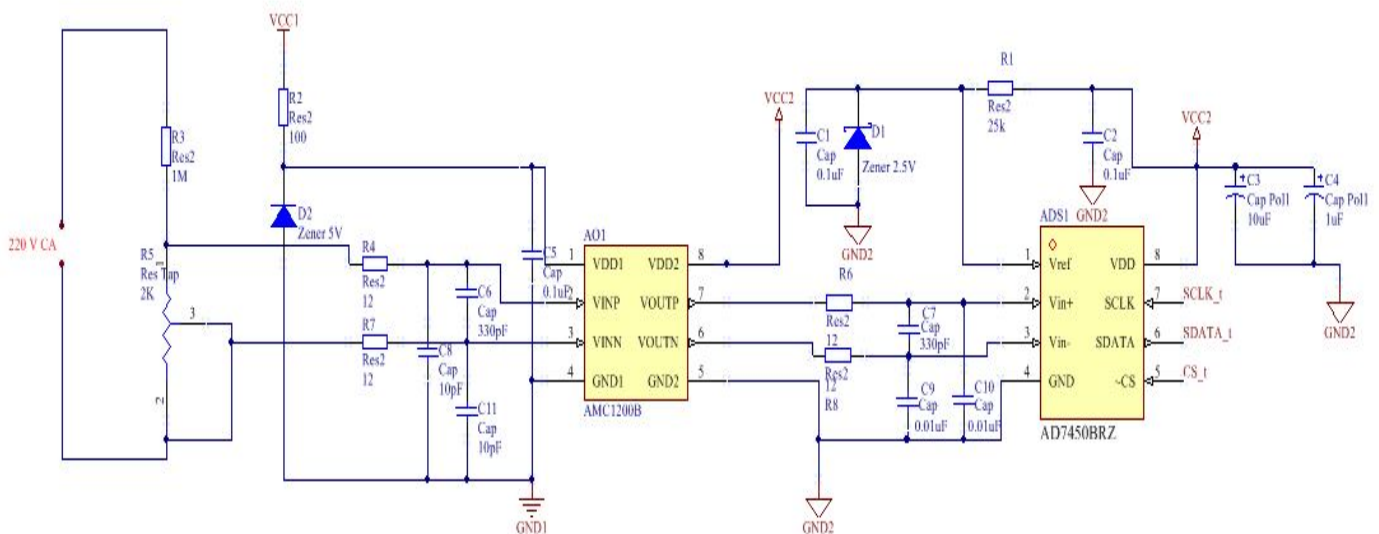


Fig. 3. Circuito de acondicionamiento de tensión.

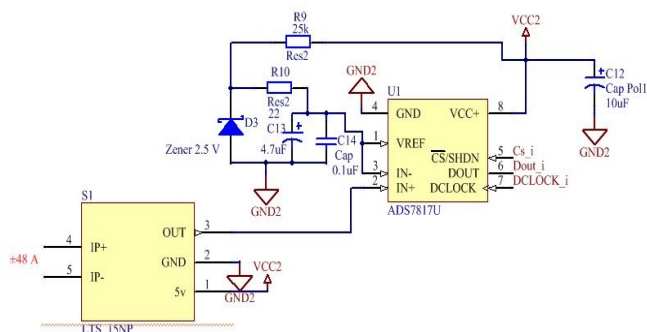
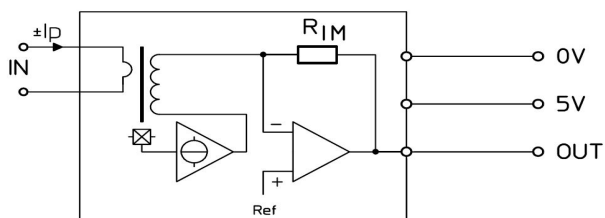


Tabla I. V_{out} vs I_{in} LEM LTS15-NP.

A continuación, se detallan los motivos de la elección de este transductor:

- Alta inmunidad al ruido, completamente necesario en este sistema ya que se está midiendo directamente sobre la red eléctrica.
- Soporta una gran corriente de sobrecarga o cortocircuito, permitiendo que se active algún dispositivo de seguridad, como puede ser una llave termomagnética, sin que el transductor reciba algún tipo de daño.

C. Digitalización de las señales

III. FIRMWARE

A. Lenguaje y Compilador

B. Organización del Firmware

A continuación, se explica las tareas llevadas a cabo por cada uno de los estados:

Fig. 6. Máquina de estado general del Medidor Inteligente de Energía.

- **PUNTO_TENS_CORR:** en la primera ejecución, luego de un reset, inicializa el Timer 0 y luego, solo adquiere el valor de tensión y de corriente de los ADC.
- **CONVERSION_DESFASE:** realiza la conversión de los dos datos obtenidos en **PUNTO_TENS_CORR** a valores reales de tensión y corriente (valores físicos medidos). Además, controla el cruce por cero de ambas señales para luego calcular el desfase entre las mismas.
- **TENS_CORR_RMS:** realiza la sumatoria de las tensiones y corrientes al cuadrado punto a punto para luego en un próximo estado calcular los valores eficaces. También se calcula el valor medio de la corriente para eliminar el offset.
- **CALCULO_POT_ENER:** a partir de la tensión eficaz, la corriente eficaz, y el desfase entre señales se obtiene la potencia instantánea en el periodo muestreado, luego se lee el valor del Timer 0 para calcular la energía. Por último, se reinicia el Timer 0.
- **MOSTRAR_DATOS:** aquí se muestra por el display los datos requeridos por el usuario, además de controlar el pulsador con el cual se puede desplazar por el menú.

C. Muestreo de la señal

La frecuencia de muestreo que se utiliza es de 1 kHz. La misma permite analizar señales de entrada de hasta 500 Hz debido al Teorema de Nyquist. La elección de esta frecuencia se debe principalmente a que la detección del cruce por cero se realiza por software [15].

D. Cálculo de la tensión y corriente eficaz

Para el cálculo de la tensión y corriente eficaz se utilizaron las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t_0}^{t_0+T} (V(t))^2} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t_0}^{t_0+T} (I(t))^2} \quad (2)$$

E. Cálculo del Desfase

El cálculo del desfase entre las señales, entre otras cosas, le da la característica de bidireccionalidad al sistema, es decir, permite conocer cuando se está consumiendo energía de la red y cuando se está entregando a la red desde el generador.

La primera tarea del algoritmo de detección de desfase es esperar a que la señal de tensión cambie su valor de positivo a negativo. Una vez detectado el cruce por cero de la tensión, se procede a buscar el cruce por cero de la señal de corriente. De esta manera se estará cubriendo los 360° necesarios para determinar si se está entregando corriente o no hacia la red eléctrica. El análisis se hace sobre un periodo y medio de las señales (Fig. 7), ya que si se hiciera sobre uno solo existe la

posibilidad que la corriente pueda cruzar por cero antes que la tensión, lo que provocaría la pérdida de información con respecto a la señal de corriente cuando la misma cambia de positivo a negativo.

Para realizar la conversión directa de la cantidad de puntos entre cruces por cero de las señales se implementó por software la Ecuación 3, en donde x es la cantidad de muestras que se encuentran entre el cruce por cero de ambas señales, y \emptyset es el desfase en radianes de la señal de corriente respecto a la de tensión.

$$\emptyset = \pi \frac{x}{10} \quad (3)$$

F. Cálculo potencia activa y energía

El cálculo de la potencia instantánea (P) y la energía (W) es lo último que se realiza antes de comenzar nuevamente la adquisición de las muestras [16]. Para calcular la potencia activa se implementa por software la Ecuación 4.

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\emptyset) \quad (4)$$

La potencia activa es la potencia capaz de transformar la energía eléctrica en trabajo. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es, por tanto, la realmente consumida por los circuitos y, en consecuencia, cuando se habla de demanda o consumo eléctrico, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda.

Para obtener el valor de energía se debe medir el tiempo (t) en el que la potencia activa se aplica, ver Ecuación 5. Por ende, se hace uso del Timer 0 del microcontrolador para determinar dicho tiempo t, según se explicó en la descripción de los estados.

$$W = P t \quad (5)$$

IV. APLICACIÓN ANDROID

La aplicación llamada Energy Home (Fig. 8), se realizó en el entorno de desarrollo de software App Inventor [17]. Dicho entorno fue creado por Google Labs para desarrollar aplicaciones Android.

La aplicación interactúa con el módulo Bluetooth del dispositivo móvil, recolectando información en forma de string cada 1 segundo. Solo en la inicialización de la aplicación, el microcontrolador envía el consumo de los 12 meses del año, para ser guardado en un archivo de texto y poder ser consultado sin necesidad de tener conectado el sistema de medición. El

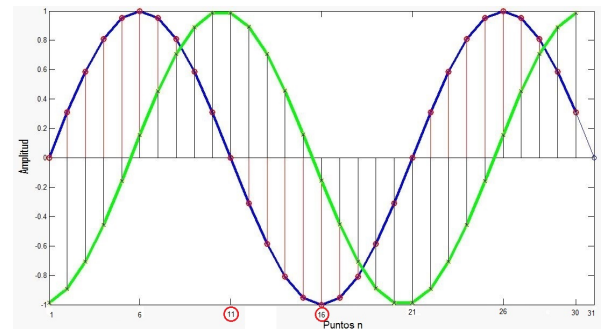


Fig. 7. Muestreo realizado a la señal de tensión (azul) y corriente (verde).

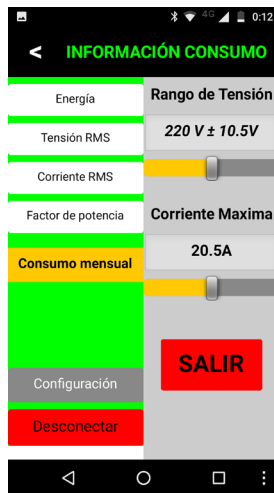


Fig. 8. Aplicación Energy Home.

archivo creado por la aplicación se puede encontrar en la carpeta contenedora de la aplicación que depende de la versión de Android. Al ser un archivo de texto, puede ser leído con cualquier editor, como también ser utilizado por otra aplicación que se encuentre instalada en el dispositivo.

V. RESULTADOS OBTENIDOS

Para comparar valores entregados por el Medidor Inteligente de Energía, se contrastaron los valores entregados por el mismo con los siguientes instrumentos de medida de laboratorio de electrónica:

- Osciloscopio Rigol MSO1074, Ancho de banda 70 MHz, Max. frecuencia de muestro 1 GSa/s, rango dinámico.
- Punta de prueba diferencial, Pintek DP-50, tensión diferencial DC+AC 6500 V, Res. entrada: 1 MΩ. Configurado con una atenuación X100, permitiendo medir una tensión alterna de hasta 230 V_{rms}, cercano a la red del hogar, que es de 220 V_{rms}.
- Pinza amperométrica de prueba, Pintek PA-622, Ancho de banda 300 kHz, con una resolución mayor a 10 mA. Configurado con una resolución de 100 mV/A para medir las cargas de bajo y medio consumo, y una resolución de 10 mV/A para la carga de consumo alto.

Para poder variar el consumo se utilizó un calientador con tres puntos distintos de potencia. Para el primer ensayo se configura en su punto medio. Las capturas del medidor y el osciloscopio se muestran en la Fig. 9 y la Fig. 10.

Para un segundo ensayo se configura el calientador para trabajar a máxima potencia (2 kW según el fabricante), quedando plasmados los resultados en la Fig. 11 y Fig. 12.

Por último, se conecta una pava eléctrica (potencia máxima de 2 kW a 2.4 kW según el fabricante) y se obtienen los resultados mostrados en las Fig. 13 y Fig. 14.

En las Fig. 10, 12 y 14, el CH1 es la medición de la red (color amarillo), el CH3 es la medición de corriente (color lila) y la



Fig. 9. Capturas del display LCD para la carga media.

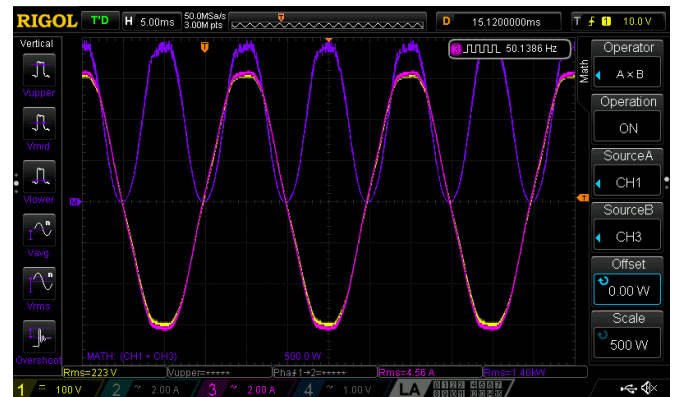


Fig. 10. Captura del osciloscopio para la carga media.



Fig. 11. Capturas del display LCD para la carga media alta.



Fig. 12. Capturas del osciloscopio para la carga media alta.

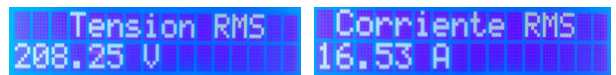


Fig. 13. Capturas del display LCD para la carga alta.



Fig. 14. Capturas del display LCD para la carga alta.

señal M (Matemática, color violeta oscuro) representa el producto del CH1 y el CH3.

En la Tabla II se muestra la comparativa entre todos los valores obtenidos por el osciloscopio y el Medidor Inteligente de Energía. Dichos valores a diferentes cargas muestran que las medidas adquiridas por el prototipo son satisfactorias.

VI. CONCLUSIONES

Los objetivos planteados se han logrado de manera satisfactoria, logrando diseñar un sistema (Fig. 15) capaz de medir la energía tanto absorbida como entregada a la red eléctrica. El mismo a su vez permite tener conectividad inalámbrica con el usuario a través de cualquier celular que trabaje sobre el sistema operativo Android. También posibilita a través de un display LCD acceder a las mediciones. La información que provee es amplia y permite al usuario tener conocimiento en tiempo real de los consumos que está teniendo en su hogar. Este tipo de dispositivos serán de suma utilidad en el momento que se comience a implementar las Smart Grid.

VII. TRABAJOS FUTUROS

En un futuro se tiene pensado realizar los siguientes cambios o agregados al prototipo.

- Cambiar el amplificador de aislamiento capacitivo por uno óptico, ya que el amplificador que se utiliza en el prototipo tiene una ganancia de 8 que también amplifica el ruido. Además, se debe atenuar la señal útil de 311 V_p a 250 mV_p. Los amplificadores de aislamiento óptico permiten por lo general una ganancia menor o igual a 1 lo que evitaría reducir la tensión de línea a niveles tan pequeños, dándole mayor inmunidad al ruido.
- El diseño de una fuente flyback (o conmutada), conformada por un conversor DC-DC y un transformador de alta frecuencia para una correcta alimentación de todos los sistemas del medidor.
- El diseño y producción de un chasis específico para contener y proteger todo el sistema de condiciones adversas.
- Migración a tecnología SMD para la reducción del tamaño del prototipo.
- Uso de la tecnología Zigbee, utilizando un protocolo que permita la interconexión de medidores en una futura ciudad inteligente.

Tabla II. Medidas adquiridas con Osciloscopio y Prototipo.

Carga	Osciloscopio			Medidor Int. De Energía		
	V_{RMS} [V]	I_{RMS} [A]	P_{RMS} [kW]	V_{RMS} [V]	I_{RMS} [A]	P_{RMS} [kW]
Medio	223	4.56	1.40	224	4.70	1.37
Media-Alta	215	8.79	2.26	216	8.70	2.25
Alta	208	16.5	4.11	208	16.5	4.12

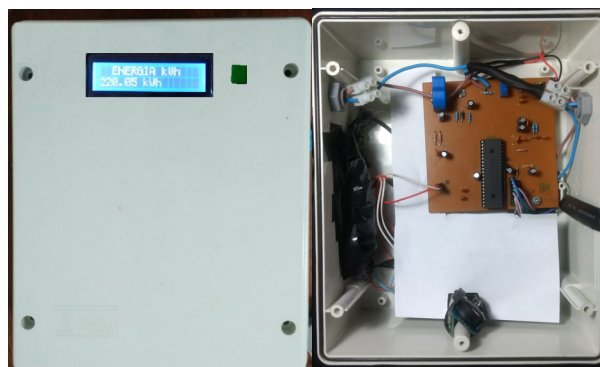


Fig. 15 Prototipo del Medidor Inteligente de Energía.

REFERENCIAS

- [1] Hatzigargyriou, N.; Asano, H.; Iravani, R. & Marnay, C. Microgrids. Power and Energy Magazine, IEEE, 2007, 5, 78-94
- [2] Platt, G.; Berry, A. & Cornforth, D. Sioshansi, F. P. (Ed.) Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energyrequired 8. What Role for Microgrids? ACADEMIC PRESS, 2012, 185-206
- [3] Casellas, S. Velazco, G. Guinjoan, F. Piqué, R. El concepto de Smart Metering en el nuevo escenario de distribución eléctrica.
- [4] E. J. Palacios-García et al., "Using smart meters data for energy management operations and power quality monitoring in a microgrid," 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 1725-1731.
doi: 10.1109/ISIE.2017.8001508
- [5] A. M. Barua and P. K. Goswami, "Smart metering deployment scenarios in India and implementation using RF mesh network," 2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), Singapore, Singapore, 2017, pp. 243-247.
doi: 10.1109/ICSGSC.2017.8038584
- [6] W. S. Yu and Y. J. Fang, "Data analysis of the smart meters and its applications in Tatung University," 2016 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFuzzy), Taichung, 2016, pp. 1-6.
doi: 10.1109/iFUZZY.2016.8004972
- [7] Texas Instruments, Datasheet AMC1200/B Fully-Differential Isolation Amplifier.
- [8] Miguel A. Perez García- "Instrumentación Electrónica"-3ra edición – 2004.
- [9] Datasheet Transducer LEM LTS 15-NP.
- [10] Analog Devices, Datasheet AD7450 ADC differential input.
- [11] Texas Instruments, Datasheet ADS7817 ADC differential input.
- [12] Manual PIC18F4550, Microchip Technology Inc.
- [13] Custom Computer Services Inc, CCS C Compiler Manual PCB / PCM / PCH, March 2015.
- [14] Eduardo García Breijo – "Compilador C CCS y Simulador Proteus para Microcontroladores PIC" –1era edición – 2008.
- [15] Alan V. Oppenheim, A.S. Willsky Libesp – "Señales y Sistemas"- 2da Edición - 2004.
- [16] José García Trasancos – "Electrotecnia" – 10ma edición –2002.
- [17] MIT App Inventor, <http://appinventor.mit.edu/explore/>, 8:00 hs-12/01/17