Medidor electrónico interactivo de consumo de energía eléctrica para uso residencial

Interactive electronic energy meter for residential use

Jhonier López Hurtado[1], Juan Camilo Arias Murillo[2], Edwin Andrés Quintero Salazar[3]

[1] *Ingeniero Electrónico, Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, jholopez@utp.edu.co*

[2] *Ingeniero Electrónico, Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, jcarias@utp.edu.co*

[3] *Magíster en Instrumentación Física, Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, Email: equintero@utp.edu.co*

Recibido 30/06/2015
Aceptado 20/11/2015

Cite this article as: J. López, J. Arias, E. Quintero, "Interactive electronic energy meter for residential use", Prospect, Vol 14, N° 1, 61-72, 2016.

RESUMEN

En este artículo se presenta el desarrollo de un medidor electrónico interactivo de energía eléctrica para uso residencial, que brinda al usuario final la posibilidad de conocer el comportamiento del consumo de energía en su domicilio. El equipo construido involucra al circuito integrado ADE7753 de Analog Devices como módulo central para la medición electrónica del consumo de energía, así como al microcontrolador PIC18F2550 de Microchip para la configuración y calibración del ADE7753 y el control y procesamiento de los datos. El sistema cuenta con un visualizador y una interfaz gráfica de usuario que a través de comunicación USB permite controlar el tiempo de los períodos de facturación, llevar el respaldo de la información procesada, visualizar el consumo actual en tiempo real, generar un histórico del consumo, y calcular el costo aproximado de la energía activa registrada. Con el fin de validar el comportamiento del sistema, se realizaron pruebas de campo y laboratorio para diferentes cargas y tiempos de medición, y utilizando como equipo patrón un medidor de energía eléctrica calibrado previamente por INELCA S.A, obteniéndose un error porcentual promedio de 0.09940% en la energía medida.

Palabras clave: Medidor de energía eléctrica; Lectura automática del medidor (AMR); Energía activa; Medidores inteligentes.

ABSTRACT

This paper presents the development of an electronic energy meter for residential use; that gives the end user the ability to understand the behavior of energy consumption at home. The built system involves the integrated circuit ADE7753 from Analog Devices as a central module for electronic measurement of energy consumption, and the Microchip PIC18F2550 microcontroller for configuration and calibration of ADE7753 and control and data processing circuit. The system has a display and a graphical user interface via USB communication allows control time billing periods, carry the backing of the processed information, display the current consumption in real time, generate a historical consumption and calculate the approximate cost of the active energy recorded. To validate system performance, field and laboratory testing for different loads and times of measurement is executed, and used as standard equipment electricity meter previously calibrated by INELCA SA, yielding an average percentage error of 0.09940% in the measured energy.

Key words: Energy meter; Automatic meter reading; Active power; Smart meters.

Doi: http://dx.doi.org/10.15665/rp.v14i1.639

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos productivos en las industrias y los quehaceres domésticos en los hogares de un país requieren de manera imperativa de diversas fuentes de energía, dentro de las cuales se destaca la eléctrica, siendo cada vez más importante su uso racional debido a la necesidad de optimizar los recursos naturales disponibles. En vista de lo anterior, es necesario que el consumidor final se transforme en un agente activo capaz de tomar decisiones que le permitan racionalizar de forma consciente su consumo de energía eléctrica. Si los consumidores pudieran monitorear la cantidad de energía que utilizan, para qué la utilizan y cuánto les cuesta, entonces podrían tomar decisiones sustentadas en bases sólidas que hagan posible optimizar el consumo y minimizar los recursos económicos destinados para este fin [1].

Esta idea ha permitido el surgimiento de sistemas de medición de consumo de energía eléctrica basados en equipos electrónicos microcontrolados [2] y que hacen uso de la tecnología conocida como "Lectura Automática del Medidor", o AMR (Automatic Meter Reading) por sus siglas en inglés, la cual hace posible la interconexión inalámbrica de múltiples sensores destinados a monitorear el consumo de energía, tal como se analiza en [3], pero con el objetivo fundamental de brindarle información del consumo a la empresa prestadora del servicio, mas no al usuario final. Por su parte, en [4] se hace una revisión del estado del arte acerca los sistemas electrónicos de medición del consumo de energía eléctrica en el sector industrial existentes en la actualidad, concluyendo finalmente que conocer con mayor detalle la dinámica del consumo se constituye como un elemento imprescindible a la hora de reducir los costos en los que incurren las empresas por este concepto, pero dejando de lado el amplio sector residencial en el que la energía eléctrica se consume de forma distribuida.

Entre tanto, en [5] se presenta un estudio acerca de los efectos causados sobre el consumo de energía eléctrica por parte de variables como el clima, las características de construcción de la residencia, la disposición de los electrodomésticos y los hábitos de los ocupantes. Para el levantamiento de la información se utilizaron medidores electrónicos inteligentes (Smart Meters), concluyéndose finalmente que no se encontró una relación directa entre los niveles de consumo de energía y el piso en el que se ubica la residencia o la edad de la construcción, pero si una alta dependencia de la edad de los residentes. Si bien este estudio presenta una aplicación importante de los medidores electrónicos interactivos, tiene como fin último establecer la incidencia que tendrían algunas variables en el comportamiento del consumo de energía de las residencias objeto de estudio, pero sin constituirse en sí mismo como un equipo que permita a los residentes estar informados permanentemente acerca del comportamiento del consumo generado. Finalmente, vale la pena destacar el experimento presentado en [6], el cual inició en Irlanda del Norte en 2002, y que consistió en estimar los cambios registrados en el consumo de energía eléctrica en sectores residenciales al permitir que los usuarios contaran con un sistema que los mantuviera permanentemente informados acerca del comportamiento del consumo. Este estudio demostró que el hecho de contar con medidores interactivos permite concientizar al usuario final acerca del consumo realizado, permitiéndole optimizarlo basado en la información recopilada, registrándose disminuciones en el consumo que oscilan entre 11 y 17%, lo cual se constituye como un fuerte indicio de que el hecho de que el consumo de energía eléctrica se realice de una forma realimentada a través de medidores inteligentes y de aplicaciones de visualización de información, permiten optimizar el consumo reduciendo los costos y racionalizando los recursos naturales disponibles.

En este artículo se presenta el diseño y la implementación de un medidor electrónico interactivo microcontrolado para uso residencial que permite monitorear el consumo de energía eléctrica en tiempo real, posibilitando la visualización del consumo actual o del histórico en una pantalla de cristal líquido, o a través de una interfaz gráfica en un computador; de tal forma que el usuario final cuente con información suficiente para tomar decisiones que propicien el uso racional de la energía eléctrica.

2. METODOLOGÍA

El sistema electrónico interactivo para la medición del consumo de energía eléctrica residencial desarrollado se encuentra conformado por las siguientes etapas:

- **Instrumentación:** en esta etapa se realiza la medición y el acondicionamiento de las señales de corriente y tensión que permite calcular la potencia.

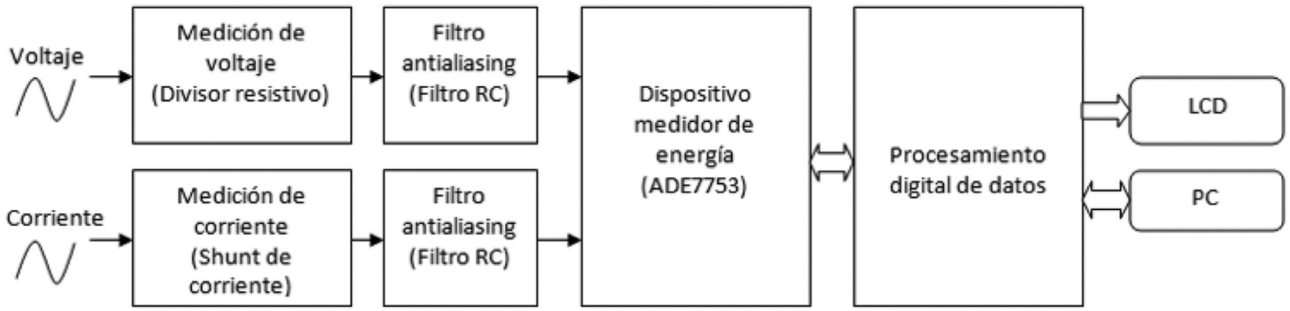
- **Medidor de energía:** este sistema está encargado de determinar el consumo de energía eléctrica, a partir de la potencia instantánea calculada.

- **Procesamiento:** este bloque se encarga de tratar los datos que se obtienen del circuito medidor de energía de tal forma que sean entendibles por el usuario. Además allí se procesa toda la información y se establece la comunicación con los diferentes dispositivos.

- **Visualización:** en esta sección se encuentra el elemento de visualización y la interfaz gráfica que permite al usuario observar la información recopilada por el sistema de medición.

Las etapas anteriormente descritas se presentan de forma gráfica en la figura 1.

Figura 1. Diagrama de bloques del medidor electrónico interactivo de consumo de energía eléctrica.
Figure 1. Block diagram of the interactive power meter.



A continuación se describe la construcción y el modo de operación de las diferentes etapas que conforman el sistema desarrollado.

2.1 Medición de corriente y tensión

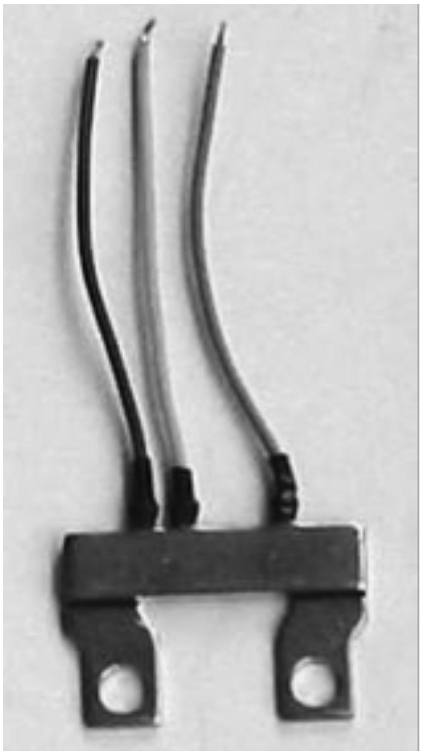
Para la medición de la corriente se utilizó un shunt de 3W y 350 $\mu\Omega$ (ver figura 2), puesto que este transductor no modifica la señal en el tiempo, es muy económico y además fácil de adquirir. El shunt de corriente introduce altas frecuencias en la señal original debido a corrientes parásitas causadas por la inductancia propia del material con el que este se encuentra fabricado. Estas señales de alta frecuencia podrían generar corrimientos de fase, los cuales son eliminados mediante la conexión en serie a los terminales del shunt de un filtro antialiasing (filtro pasa baja) que permite rechazar las frecuencias superiores a la banda de interés para las mediciones (40 Hz a 2 kHz).

Entre tanto, para la medición del voltaje se usó un arreglo de resistencias configuradas como divisor de tensión, con un total de 6 elementos de 100kΩ cada uno.

2.2. Dispositivo medidor de energía (ADE7753)

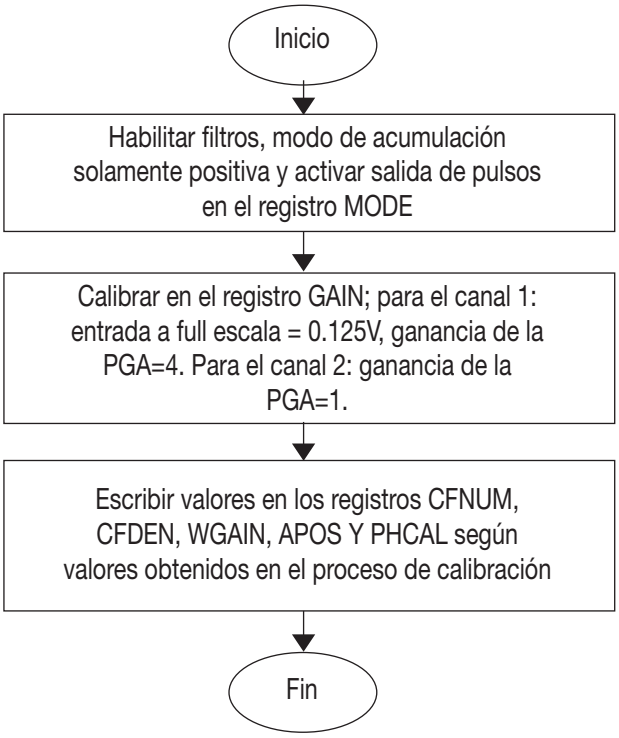
Este circuito integrado desarrollado por Analog Devices está encargado de realizar la medición del consumo de energía activa de forma análoga, siendo capaz de entregar información acerca de las variables medidas de forma digital, con solo llevar a él las señales de voltaje y corriente previamente acondicionadas. Este dispositivo incorpora todo el procesamiento de señales requerido para realizar mediciones de energía activa, reactiva y aparente, periodo de voltaje de línea y el cálculo rms de voltaje y corriente. Además cuenta con dos convertidores análogo-digital (ADCs) de segundo orden de 16 bits (uno para cada canal), un integrador seleccionable en el canal 1 (CH1) necesario para sensores de corriente de la forma di/dt, sensor de temperatura, y otros circuitos de referencia. Este dispositivo proporciona una interfaz serie (SPI) para leer los datos y una salida de pulsos de frecuencia (CF) proporcional a la energía activa medida [7].

Figura 2. Resistencia Shunt utilizada para la medición de corriente.
Figure 2. Shunt resistance used for current measurement.



Como se mencionó anteriormente, el ADE7753 cuenta con un módulo de comunicación SPI a través del cual es posible configurar los diferentes modos de operación del dispositivo, además de proporcionar la interfaz necesaria para realizar la calibración del medidor, proceso que se ilustra en el diagrama de flujo presentado en la figura 3 [7].

Figura 3. Proceso de calibración del circuito integrado ADE7753.
Figure 3. Calibration of integrated circuit ADE7753.



2.3 Procesamiento

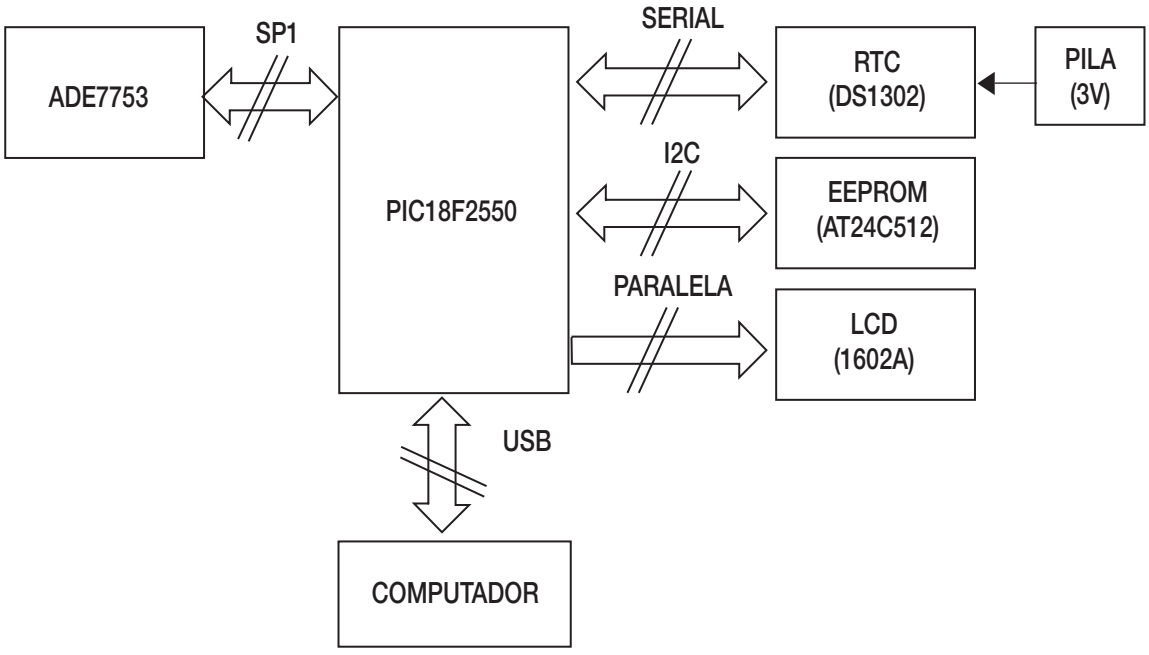
El esquema general de la etapa de procesamiento se presenta en la figura 4 y la función que cumple cada uno de estos dispositivos se describe a continuación.

2.4 Microcontrolador

Este elemento es el encargado de procesar toda la información y establecer comunicación con los dispositivos utilizados en el sistema. A través del módulo de comunicaciones SPI, el microcontrolador establece conexión con el ADE7753 encargado de la medición del consumo de energía activa. En esta etapa, el PIC es el encargado de escribir ciertos registros del ADE7753 para su calibración, y de leer el registro de acumulación de energía en el ADE7753, dato que es convertido a kWh para que sea comprensible por el usuario final. También es el encargado de monitorear permanentemente la fecha, para de esta forma establecer un periodo de corte en la acumulación del consumo de energía, ya que normalmente este último tiene un periodo de facturación mensual.

Por otra parte, mediante el protocolo de comunicación I2C, el microcontrolador establece comunicación con una memoria EEPROM para realizar el respaldo del consumo actual en kWh, el incremento del acumulado del consumo de energía activa, el consumo de 12 periodos de facturación anteriores y las variables utilizadas para establecer estos periodos. Además, el PIC se encarga de establecer comunicación con un computador, utilizando el protocolo de comunicación USB2.0, para transmitir la información correspondiente de los

Figura 4. Diagrama de bloques que ilustra los dispositivos involucrados en la etapa de procesamiento.
Figure 4. Block diagram of the devices involved in the processing step.



12 períodos anteriores de acumulación de energía a la interfaz gráfica de usuario. Así mismo, mediante la comunicación con una pantalla LCD la información correspondiente al consumo en kWh actual, la fecha y la hora pueden ser visualizadas por el usuario en tiempo real [8].

Memoria EEPROM AT24C512

Como se mencionó anteriormente, esta memoria es utilizada para almacenar el acumulado del consumo de energía activa, los kWh consumidos al mes, los kWh consumidos en 12 periodos anteriores, y demás variables necesarias para realizar los cálculos en el microcontrolador. Este dispositivo se hace necesario para no perder la información almacenada cuando se registra ausencia del suministro de energía del sistema [9].

Reloj de tiempo real (RTC) DS1302

El reloj de tiempo real DS1302 es el encargado de mantener actualizada la fecha y la hora del sistema, los cuales se hacen necesarios para monitorear la fecha de corte del periodo mensual de acumulación de los kWh registrados [10].

En las figuras 5 y 6 se observa el diagrama de flujo del algoritmo implementado en el microcontrolador para llevar a cabo todas las funciones anteriormente descritas.

2.4 Interfaz

El sistema desarrollado cuenta con dos mecanismos mediante los cuales el usuario puede visualizar la energía eléctrica consumida en tiempo real, al igual que los registros históricos. Estas dos estrategias se describen a continuación.

Display de cristal líquido (LCD) 1602ª

Como se mencionó anteriormente, esta pantalla de visualización brinda al usuario la posibilidad de monitorear en tiempo real el consumo de energía eléctrica para así obtener conclusiones acerca del comportamiento del mismo. Además, en ella puede visualizar la fecha y hora actuales [11].

Interfaz gráfica

Con el objetivo de facilitar la visualización y el análisis de los datos de consumo recopilados, se desarrolló una interfaz gráfica en la plataforma Microsoft Visual Basic. Esta herramienta permite también al usuario visualizar los consumos de los últimos doce meses, recibiendo la información desde el sistema microcontrolado a través de una conexión USB. La figura 7 permite observar el diagrama de flujo del programa que soporta la interfaz.

Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el microcontrolador.
Figure 5. Flowchart of the algorithm implemented in the microcontroller.

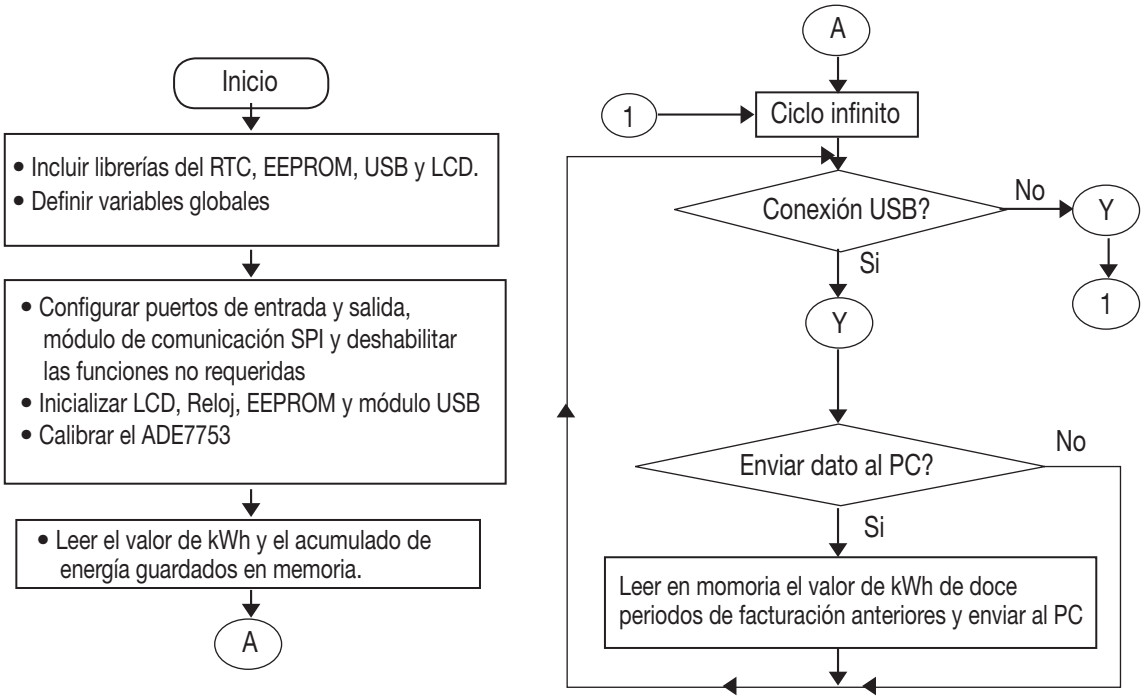
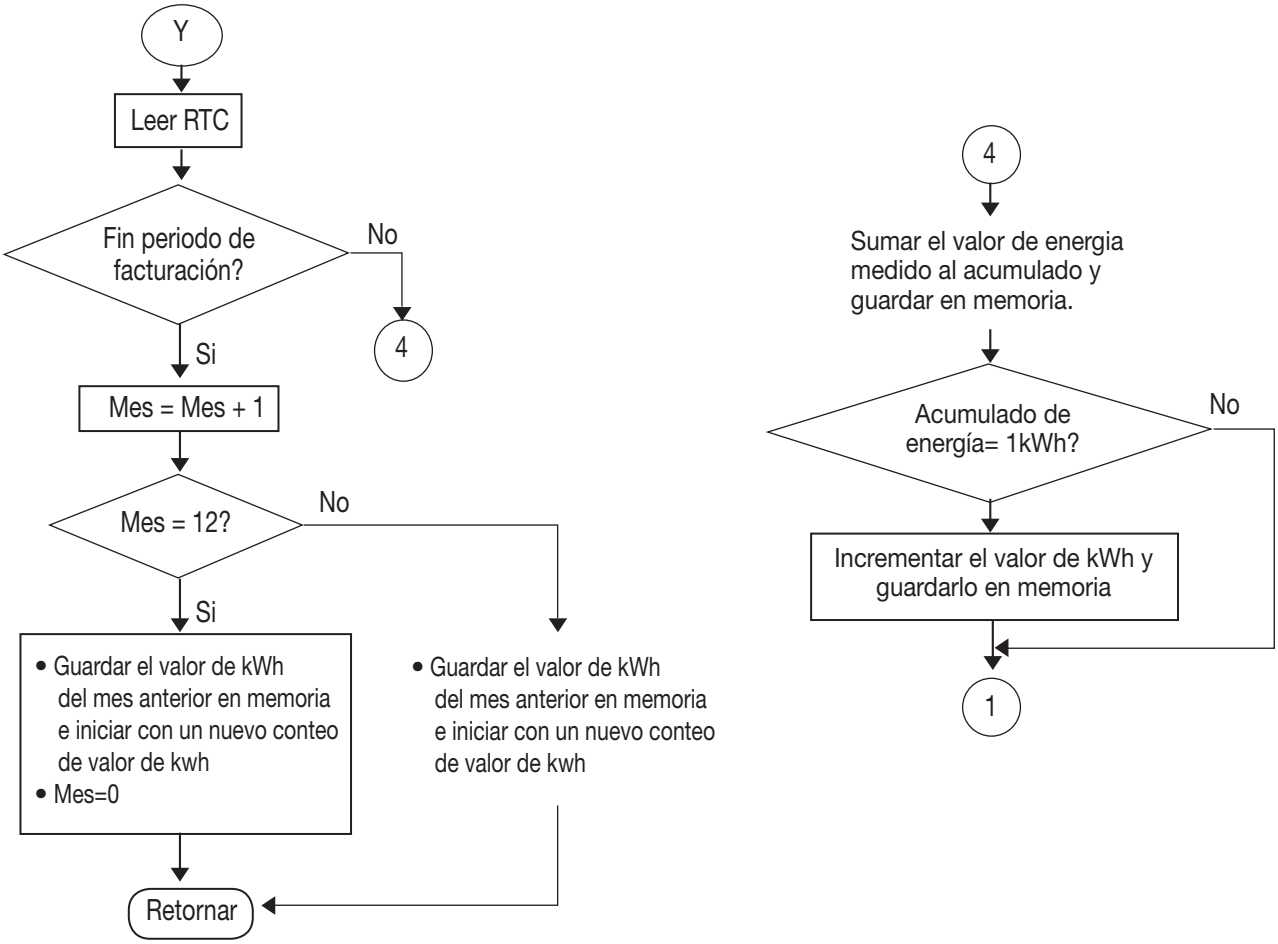


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el microcontrolador (continuación).
Figure 6. Flowchart of the algorithm implemented in the microcontroller (continued).



2.5 Ensamble y calibración

Las figuras 8, 9 y 10 presentan los diagramas esquemáticos finales diseñados para las etapas de alimentación, medición y procesamiento, respectivamente. Por su parte, la figura 11 ilustra el aspecto final del sistema desarrollado.

El proceso de calibración se llevó a cabo utilizando un medidor de referencia previamente calibrado por la empresa INELCA S.A., tal como se indica en las páginas 38 a 44 de la hoja de datos del circuito integrado ADE7753 [7], permitiendo la opción de compensar ganancia y offset para la calibración de energía activa y aparente, además de compensación de fase para corregir errores de este tipo en la energía activa, reactiva y aparente. Cuando se utiliza un medidor de referencia, la frecuencia de la salida de pulsos (CF) del ADE7753 se ajusta para que coincida con la frecuencia de la salida de pulsos del medidor de referencia. Es preciso mencionar que la calibración por medio de la salida de pulsos es válida solamente para la medición de energía activa en el ADE7753, por lo cual el medidor electrónico interactivo desarrollado solo encuentra aplicación en uso residencial. El proceso de calibración mediante el medidor de referencia se ilustra en la figura 12.

Figura 7. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica desarrollada.
Figure 7. Flowchart GUI developed.

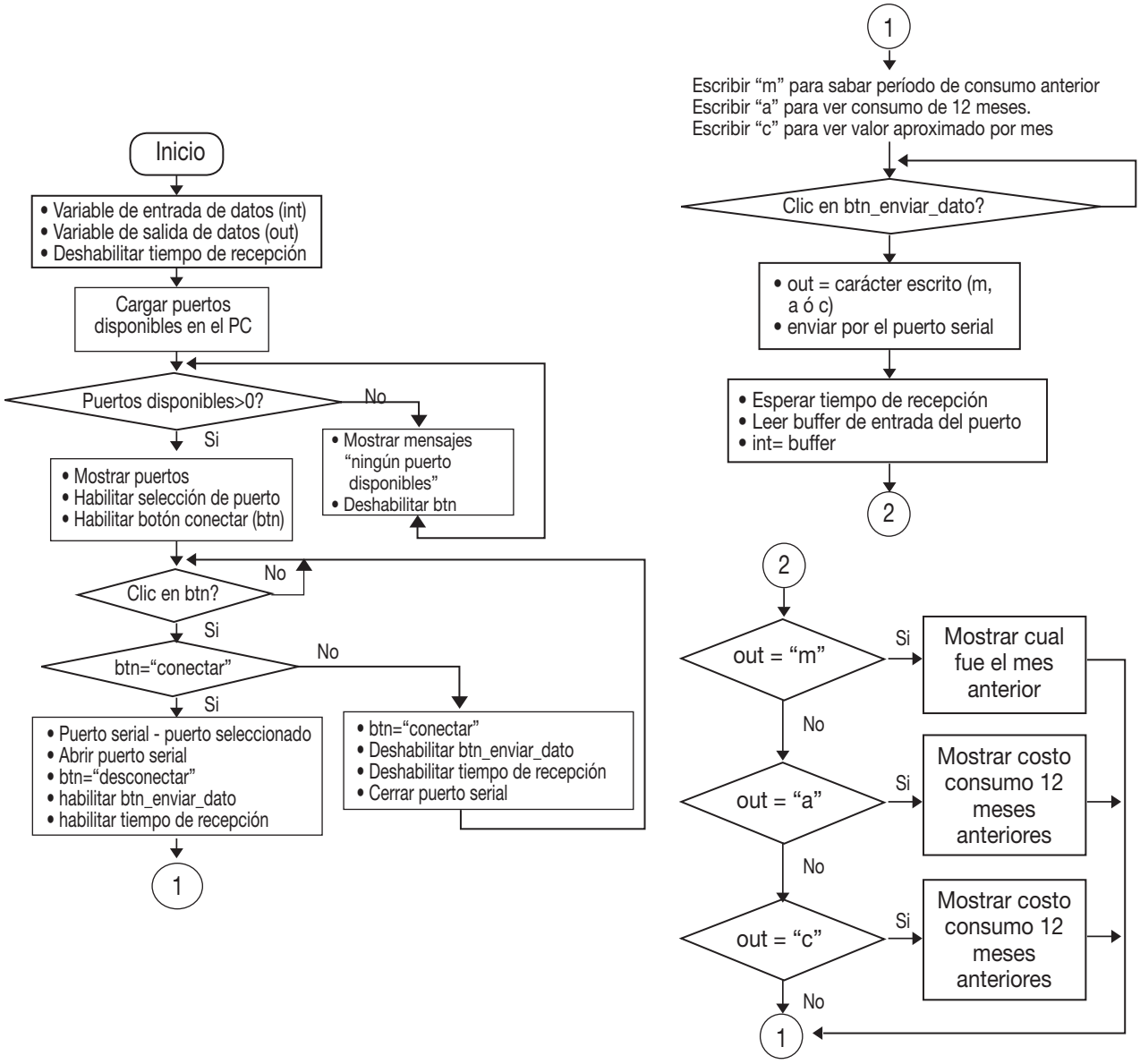


Figura 8. Diagrama esquemático de la etapa de alimentación.
Figure 8. Schematic diagram of the power stage.

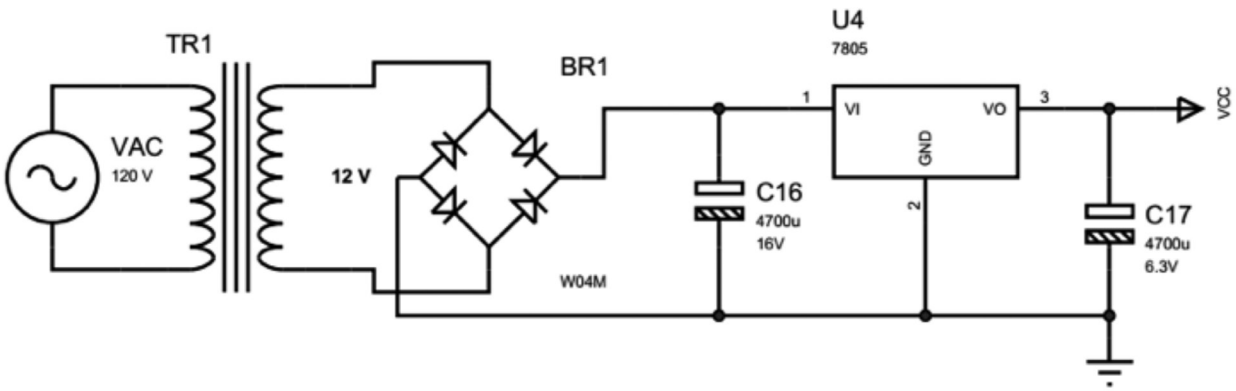


Figura 9. Diagrama esquemático de la etapa de medición.
Figure 9. Schematic diagram of the measuring step.

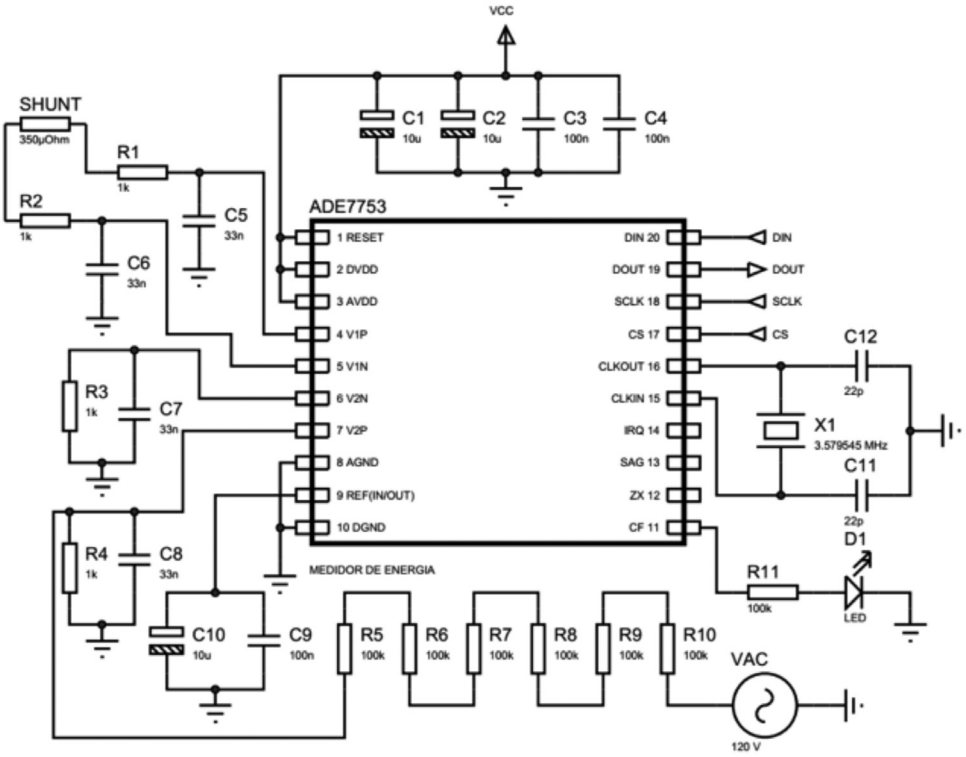


Figura 10. Diagrama esquemático de la etapa de procesamiento.
Figure 10. Schematic diagram of the processing step.

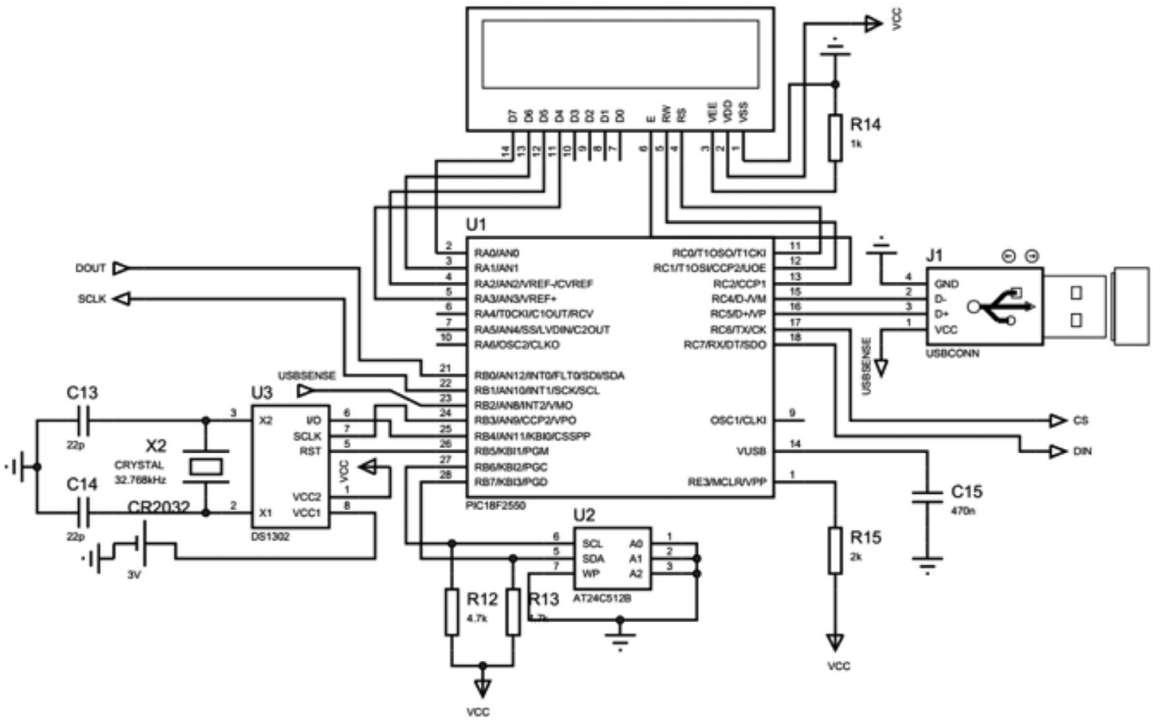


Figura 11. Vista interior del equipo de medición electrónico interactivo de energía eléctrica de uso residencial desarrollado.
Figure 11. Interior view of the energy meter developed.

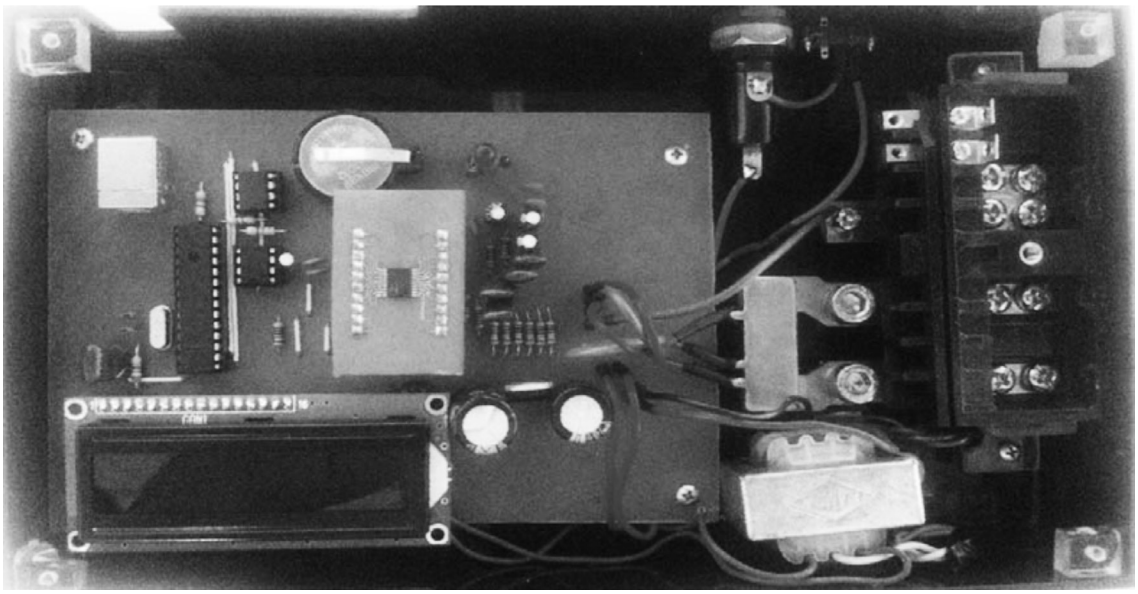


Figura 12. Diagrama de flujo del procedimiento de calibración.
Figure 12. Flowchart of the calibration procedure.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de evaluar el desempeño del sistema desarrollado, se llevaron a cabo dos pruebas, una de laboratorio y otra de campo.

3.1 Prueba de laboratorio

En esta fase de la puesta en funcionamiento del equipo desarrollado se adelantaron las siguientes actividades:

• Medición y comparación de la frecuencia de los pulsos (CF) del medidor desarrollado con respecto a los registrados por el medidor de referencia, para diferentes valores de carga, obteniéndose un error porcentual promedio de 0,015%. Los resultados se presentan en la figura 13, en la cual se observa que los pulsos generados por el sistema construido siguen fielmente los producidos por el equipo patrón.

• Comparación entre el consumo acumulado registrado a lo largo de 3 horas por el medidor de referencia y el sistema desarrollado, registrándose valores idénticos a lo largo de la prueba, según se reporta en la tabla 1.

Figura 13. Frecuencia de pulsos (CF) registrada para el medidor de referencia y para el equipo desarrollado en función de la carga. Nótese que las dos curvas son prácticamente idénticas.
Figure 13. Pulse frequency (CF) registered for the reference meter and the equipment developed according to the load. Note that the two curves are almost identical.

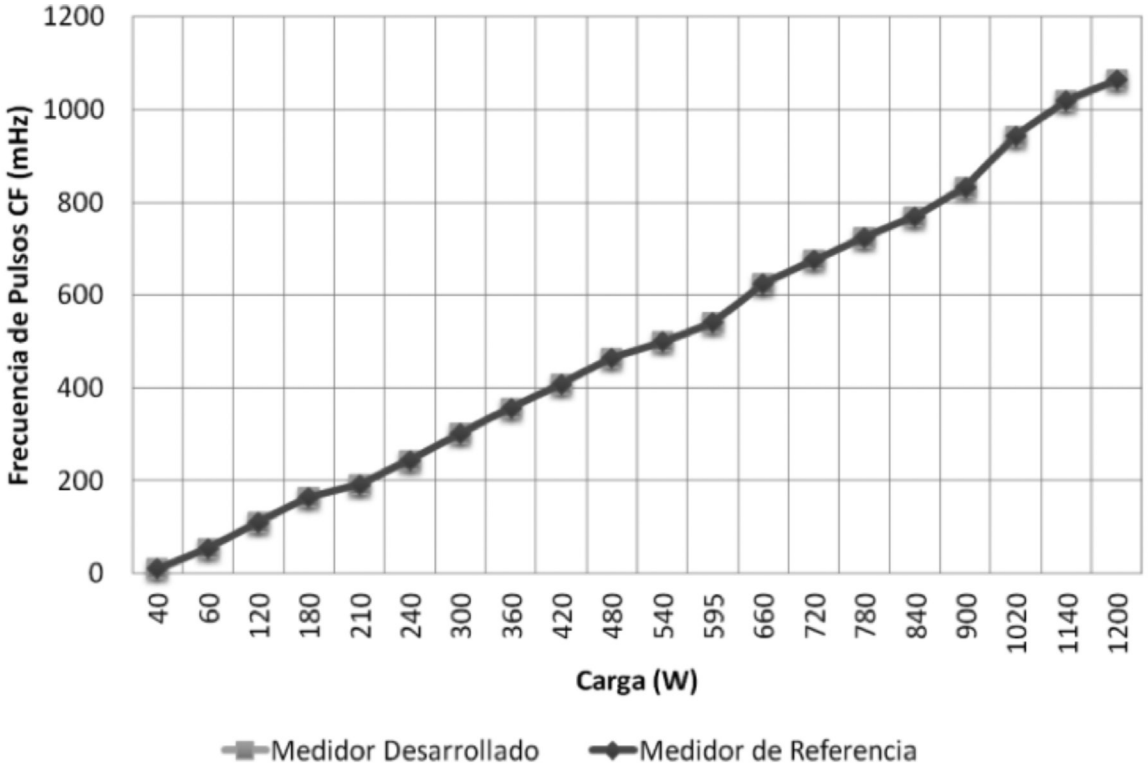


Tabla 1. Comparación del consumo acumulado a lo largo de tres horas para el medidor desarrollado y el de referencia.
Table 1. Comparison of consumption accumulated over three hours to the meter and reference developed.

CARGA [W]	CONSUMO MEDIDOR DE REFERENCIA [KWH]	CONSUMO MEDIDOR DESARROLLADO [KWH]	DURACIÓN PRUEBA/ CARGA [HORAS]
720	2	2	3
1020	3	3	3
1200	3	3	3

3.2 Prueba de campo

Además de las pruebas de laboratorio descritas anteriormente, y posterior a ellas, el medidor desarrollado fue instalado por dos días en la residencia ubicada en la carrera 27 No 3 - 94, de la ciudad de Pereira, Risaralda, Colombia; la cual posee una acometida monofásico bifilar. El medidor se instaló entre el medidor de la empresa de energía y el compartimento de totalizadores. Los resultados de esta prueba se presentan en la tabla 2, en la cual se observa que para un tiempo de registro de 36 horas, los consumos medidos por el equipo patrón y el sistema desarrollado son idénticos.

Tabla 2. Resultados prueba de campo.
Table 2. Field test results.

Consumo medidor empresa de energía [kWh]	Consumo medidor d esarrollado [kWh]	Duración prueba [horas]
15	15	36

3.3 Especificaciones técnicas del equipo desarrollado

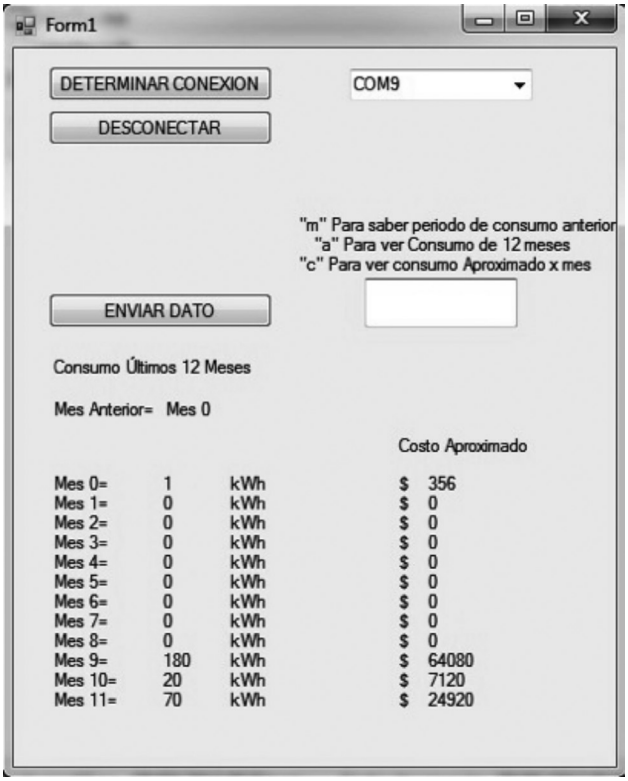
A partir de las pruebas realizadas y considerando las características técnicas de los elementos que conforman el sistema, se establecieron las especificaciones que se presentan en la tabla 3 para el medidor electrónico interactivo de energía eléctrica desarrollado. Estos parámetros posibilitan la evolución del sistema desarrollado, de un prototipo de experimentación para el estudio del consumo racional de energía eléctrica en residencias, a un equipo factible de comercialización que podría instalarse de forma masiva en los hogares colombianos con el fin de generar conciencia en la población nacional acerca de la necesidad del uso racional de la energía eléctrica.

Tabla 3. Especificaciones del equipo desarrollado.
Table 3. Equipment specifications.

Voltaje de línea	120 V
Frecuencia de línea	60 Hz
Corriente máxima	60 A
Carga máxima	7200 W
Resolución kWh	347.608 μWh
Máximo Acumulado kWh/mes	65535 kWh
Precisión	±1 %
Nivel de confianza	95%
Error máximo	-0.09940 %
Error máximo en el medidor de referencia	0.66 %

Finalmente, la figura 14 presenta el aspecto que registra la interfaz gráfica desarrollada, en la cual se observa el consumo mensual con su correspondiente costo estimado. Figura 14. Consumo mensual y costo estimado presentados en la interfaz gráfica de usuario.

Figura 14. Consumo mensual y costo estimado presentados en la interfaz gráfica de usuario.
Figure 14. Monthly consumption and cost estimate presented in the GUI.



4. CONCLUSIONES

• El uso del circuito integrado ADE7753 como dispositivo central para la medición de energía eléctrica ofrece economía y versatilidad en el equipo desarrollado, ya que este dispone de todo el hardware necesario para el tratamiento de las señales de corriente y de voltaje previamente acondicionadas, con lo que se consigue obtener datos de manera rápida, precisa y en forma digital, lo que facilita de manera significativa la gestión de la información, además de tratarse de un dispositivo de tamaño reducido, y como si fuera poco, ofrece alta confiabilidad en las medidas tomadas al permitir la calibración mediante el uso de medidores de referencia.

• En cuanto a la funcionalidad del prototipo medidor

de energía, se concluye que, al disponer de una pantalla que presenta el consumo y costo aproximado de este consumo en tiempo real, y de una interfaz gráfica en un computador para la gestión de periodos de facturación anteriores, se trata de un equipo sumamente útil pues ofrece al usuario final la capacidad de comprender el comportamiento del consumo de energía eléctrica en su domicilio, con lo cual contará con las bases que le permitan tomar decisiones que propendan por la optimización del presupuesto familiar, en cuanto a energía eléctrica respecta. Además de estas funcionalidades, el equipo está construido con dispositivos económicos y de fácil consecución en el mercado, lo que facilita su masificación y/o desarrollo propio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan expresamente sus agradecimientos a la Universidad Tecnológica de Pereira por facilitar sus instalaciones, materiales y equipos de laboratorio con el fin de desarrollar y poner a prueba el equipo desarrollado.

REFERENCIAS

[1] M. Venables, "Smart Meters Make Smart Consumers [Analysis]", Engineering & Technology, 2(4), 23, 2007.

[2] P. A. V. Loss, M. M. Lamego, G. C. D. Sousa, J. L. F. Vieira, "A single phase microcontroller based energy meter", Instrumentation and Measurement Technology Conference. IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE, 2, 18-21, 1998.

[3] P. Corral, B. Coronado, A. C. De Castro Lima, O. Ludwig, "Design of Automatic Meter Reading based on Zigbee", Latin America Transactions, IEEE, Revista IEEE America Latina, 10(1), 1150-1155, 2012.

[4] E. O'Driscoll, G. E. O'Donnell, "Industrial power and energy metering–a state-of-the-art review", Journal of Cleaner Production, 41, 53-64, 2013.

[5] A. Kavousian, R. Rajagopal, M. Fischer, "Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants behavior", Energy, 55, 184-194, 2013.

[6] W. Gans, A. Alberini, A. Longo, "Smart meter devices and the effect of feedback on residential electricity consumption: Evidence from a natural experiment in Northern Ireland", Energy Economics, 36, 729-743, 2013.

[7] Analog Devices Inc. (2010), Data sheet ADE7753: Single – Phase Multifunction Metering IC with di/dt Sensor Interface. [On Line], p. 1 – 60. Disponible desde <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7753.pdf> [Acceso 10 de agosto de 2014].

[8] Microchip Technology Inc. (2004), Data sheet PIC18F2455/2550/4455/4550: 28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nano Watt Technology. [On Line], p. 1- 426. Disponible desde <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632b.pdf>. [Acceso 5 de junio de 2014].

[9] Atmel Corporation. (2007), Data sheet AT24C512: Two-wire Serial EEPROM. [On Line], p. 1 – 22- Disponible desde <http://www.atmel.com/Images/doc1116.pdf>. [Acceso 10 de junio de 2014].

[10] Maxim Integrated Products. (2013), Data sheet DS1302: Trickle-Charge Timekeeping Chip. [On Line], p. 1- 13. Disponible desde <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1302.pdf>. [Acceso 20 de junio de 2014].

[11] Shenzhen Eone Electronics Co. (2005), Specification for LCD Module 1602A-1 (V1.2). [On Line], p. 1 -12. Disponible desde <https://www.openhacks.com/uploads-productos/eone-1602a1.pdf>. [Acceso 30 de junio de 2014].