

# Design and Implementation of Smart Energy Management System using IoT technology

Ernesto Cárcamo, Néstor Hernández, Misael Hernández

Instituto de Investigación e Innovación en Electrónica  
Universidad Don Bosco  
Soyapango, El Salvador

Carlos Bran

Instituto de Investigación e Innovación en Electrónica  
Universidad Don Bosco  
Soyapango, El Salvador  
cbran@udb.edu.sv

**Abstract**— This paper describes the methodology used for the design and implementation of an alternative technology for smart energy management devices, with enhanced capabilities of the conventional measurement equipment.

We use a Internet of Thing controller, to add capabilities for real time monitoring to establish users defined threshold that activate alarms and on/off control capabilities over the electrical loads.

**Index Terms**—Current sensor, Internet of thing, Controller, Electric power, Energy consumption.

## I. INTRODUCCIÓN

En nuestro país, el costo de la energía eléctrica se ha convertido en un problema tanto para personas naturales como empresas, por lo general la gestión del consumo energético se maneja de forma reactiva, ya que el consumidor no tiene acceso a una medición en tiempo real del servicio que recibe, y dicha información solo esta disponible a fin de mes al recibir el monto de la factura que debe pagarse al distribuidor. [1][2].

Por otro lado las instalaciones eléctricas no disponen, de mecanismos que indique la cantidad de energía que se está consumiendo en cada uno de los ramales conectados, lo que hace todavía mas complicado el detectar las cargas que tienen mayor incidencia en costo de la energía [3].

En el mercado existen medidores de potencia y de consumo energético (Fluke [4], PCE instruments [5]) con diferentes características, pero estos tienen precios privativos para pequeñas residencias o negocios, a la vez estos instrumentos solo presentan la medición de la variable, no emiten una alerta de sobrecarga para cotas configuradas por el usuario y no ofrecen la alternativa de gestión remota de medición o las cargas conectadas a los ramales.

El prototipo que se propuesto en este trabajo representa una alternativa para la gestión energética de bajo costo, con características como: facilidad de configuración/uso, capacidad de control remoto de cargas vía Internet y medición en tiempo real, por lo que constituye una alternativa a los medidores comerciales, con mejoras evidentes.

El documento abordara el tema de investigación desde los principios matemáticos utilizados para la medición del consumo energético, los dispositivos/componentes utilizados para su implementación; el modelo, procesos de diseño,

especificaciones, limitaciones tomadas en cuenta para la propuesta, el proceso de implementación del prototipo, la interfaz web de usuario, para concluir con los resultados de la puesta en funcionamiento del sistema y las consideraciones para trabajos futuros.

## II. MEDICIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO

La medición del consumo energético es un aspecto muy importante que implica la correcta elección de dispositivos que cumplirán tal función, acondicionamiento de señales, cálculos matemáticos y todos lo necesario para que la información proporcionada por el medidor sea legible al usuario; para calcular la potencia o energía de un sistema eléctrico es necesario conocer dos variables: el voltaje y la corriente presentes en el punto de medición [6].

En la actualidad existen dos formas de realizar las mediciones que dependen del sensor utilizado, la primera es de forma invasiva en la cual el sensor tiene contacto directo con el sistema y forma parte del circuito que mide, afectando ligeramente la precisión de la medida; la segunda forma es no invasiva, en donde el sensor no interfiere con el sistema debido a hacer uso de métodos inductivos. Es importante saber que los sensores que se utilizan para la medición de tales variables pueden expresar sus valores de forma efectiva (RMS) o pico, por lo que debe tenerse un especial cuidado con el acondicionamiento del resultado de la medición.

### Medidor de Corriente

Para la solución del sensor de corrientes se considero el dispositivo no invasivo SCT-013-00 que presenta las siguientes características: corriente máxima medible 100 A, corriente máxima de salida 50mA y aislamiento galvánico, tal como se muestra en la figura 1.

El sensor de corriente tiene como entrada corriente alterna y salida corriente alterna proporcional a la corriente de entrada, lo que implicó la utilización de resistencias de instrumentación para la representación a voltaje de la medida a fin de que pueda procesarse con el ADC. Para el cálculo de la resistencia de carga se procedió primero a calcular la corriente pico máxima del bobinado primario:

$$I_{\text{primario}} = I_{\text{rms}} * \sqrt{2} \quad (1)$$



Fig. 1. Sensor de corriente SCT-013-00

Donde  $I_{rms}$  es la corriente máxima en las especificaciones del dispositivo. Resolviendo (1) para  $I_{rms}=100A$ :

$$I_{p(primario)} = 100 A * \sqrt{2} = 141.4 A \quad (2)$$

Luego se determinó la corriente pico máxima en el secundario tomando en cuenta la relación que tiene el primario con el secundario en cantidad de vueltas:

$$vueltas = \frac{I_{rms(primario)}}{I_{rms(secundario)}} = \frac{100 A}{50 mA} = 2000 vueltas \quad (3)$$

Por lo tanto la corriente pico máxima del secundario:

$$I_{p(secundario)} = \frac{I_{p(Primario)}}{vueltas} = \frac{141.4 A}{2000 vueltas} = 0.0707 A \quad (4)$$

La corriente generada en el primario y secundario teóricamente tiene forma senoidal, lo cual indica que posee tanto valores positivos como negativos. Considerando que los dispositivos digitales en su mayoría no pueden leer valores negativos en los ADC, fue necesario la aplicación de un offset a través de una resistencia de carga para poder adaptar el valor leído a la resolución del dispositivo [7] por lo que se procedió a calcular la resistencia de carga dada por:

$$R_{carga} = \frac{A_{ref}}{2 I_{p(secundario)}} \quad (5)$$

Donde  $A_{ref}$  es el voltaje de referencia análogo utilizado por el ADC en el dispositivo lógico. Siendo el valor utilizado  $A_{ref}=5V$  por lo tanto:

$$R_{carga} = \frac{\frac{A_{ref}}{2}}{I_{p(secundario)}} = \frac{\frac{5V}{2}}{0.0707 A} = 35.4 \Omega \quad (6)$$

Dado que el valor resultante no es un valor comercial se utilizó el valor más próximo  $33\Omega$  con una tolerancia del 1%.

#### A. Calculo de Corriente RMS

Una vez obtenido el valor de la resistencia de carga la corriente que fluye a través del embobinado y la resistencia, genera un voltaje que entra directamente al módulo ADC. Para obtener el voltaje máximo de entrada se procede a calcular la corriente máxima pico-pico del secundario:

$$I_{p(secundario)} = 0.0707 A \text{ pico} * 2 \quad (7)$$

$$I_{p(secundario)} = 141.4 A \text{ pico-pico}$$

Una vez obtenido este dato se calcula el voltaje máximo generado por la resistencia de carga:

$$V_{ac} = I_{pp(secundario)} * R_{carga} = 141.4 mA * 33\Omega = 4.66 V \quad (8)$$

Este voltaje es traducido por el ADC a un valor específico dependiendo de la resolución que tenga el dispositivo, por ejemplo al tener una resolución de 10 bits, el voltaje mínimo leído sería de:

$$V_{min} = \frac{4.66 V}{2^{10}} = 4.55 mV \quad (9)$$

Obteniendo en la variable almacenada del microcontrolador un valor de 1. La obtención del valor correspondiente a la corriente es obtenido por una regla de tres obteniendo la ecuación siguiente:

$$I_{rms} = \frac{(dato almacenado * 4.55 mV) * 141.4 mA}{4.66 V} \quad (10)$$

#### B. Calculo de Potencia

Los medidores de consumo instalados en los hogares realizan la medición de la potencia del sistema adquiriendo valores de voltaje y corriente efectiva (RMS) aplicando la siguiente fórmula [8][9]:

$$P = V_{rms} * I_{rms} \quad (11)$$

En este caso el dispositivo utilizado mide solamente la corriente efectiva que pasa por el sistema, que luego es multiplicada por el voltaje efectivo, aproximadamente de

114V, con ligeras variaciones con lo que puede considerarse como una constante para el procesamiento en el programa creado.

### C. Cálculo de energía

El cálculo de la energía es similar al de potencia, con la única diferencia que este se obtiene en un tiempo determinado. Por lo que el cálculo de la energía se realizó con la siguiente fórmula:

$$Energía = P_{prom} * \Delta t \quad (12)$$

En donde:

$P_{prom}$ : Potencia promedio del sistema (Watts) en el transcurso de la medición de energía.

$\Delta t$ : cantidad de tiempo en segundos que transcurrieron desde el inicio hasta el fin de la medición.

Para poder presentar esta energía en un formato más común, es decir, KWh se aplicó las conversiones necesarias obteniendo:

$$energía(KWh) = \frac{P_{prom}}{1000} * \frac{\Delta t}{3600} \quad (13)$$

## III. DISEÑO DEL SISTEMA

### A. Modelo de Concepto

Los valores de potencia instantánea y consumo energético en el sistema se obtienen de la siguiente manera: con el sensor de corriente SCT-01300 se obtiene un valor que es correspondiente a la potencia que se está consumiendo en tiempo real, esta corriente se hace circular por un arreglo de resistencias previamente calculadas, mediante un factor de calibración proporcionado por la hoja de datos del fabricante[10], de esta manera se obtiene un valor de voltaje con un adecuado offset, para poder ser ingresado al ADC del módulo IoT Spark Core.

Con la información digitalizada, el firmware programado hace el cálculo de la potencia y el cálculo de la energía consumida en un intervalo de tiempo, el valor de potencia medido es comparado con el valor de potencia de referencia deseado por el usuario como límite configurable, si el valor de potencia excede el límite, se activa una alarma la cual es enviada vía internet a una página web, que sirve de interfaz entre el usuario y el sistema. Mediante esta página además de recibir la información de la alarma, se puede manipular de manera remota la activación o desactivación de las cargas, con un simple clic.

Al recibir la información de la nube, se activan o desactivan las salidas digitales del Spark Core, las cuales controlan circuitos para manipular cargas de potencia, como se puede apreciar en la figura 2.

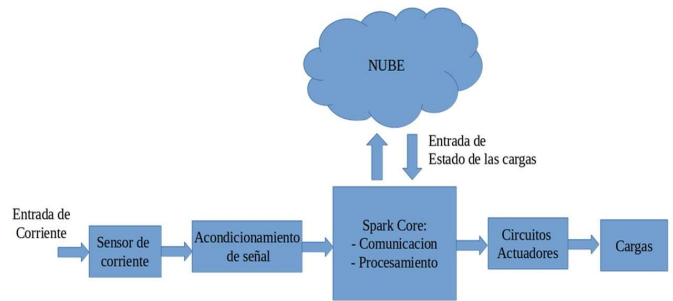


Fig. 2. Diagrama funcional del sistema

### B. Especificaciones de entrada

El sistema está compuesto de dos entradas las cuales se describen a continuación:

La primera es física para sensor de corriente SCT-013-00, con el cual el sistema es capaz de medir corrientes de hasta 100 amperios, a un voltaje pre establecido de 110 Vac, de esa manera se puede medir la potencia instantánea de la mayoría de cargas de uso común. La otra entrada a nuestro sistema es el límite de potencia para la fijación de la alarma de consumo, la cual se pasa desde la aplicación web.

Mediante la aplicación además se puede monitorizar el estado de las cargas (Activas/Inactivas), además de poder ejercer una acción sobre las mismas para cambiar su estado vía internet con lo que es posible tener una realimentación directa del consumo de potencia y el efecto de gestión que se tiene sobre las cargas.

### C. Dispositivo IoT y funcionamiento de algoritmos

El Spark Core, es un módulo de IoT que brinda de conectividad WiFi, además de capacidad de procesamiento y espacio en la nube para la gestión remota de funciones y variables, entre sus características incluyen: un módulo WiFi, procesador ARM Cortex M3, puertos I/O y capacidad de programación compatible con Wiring, está pensado para ser una plataforma de desarrollo rápido de soluciones y servicios con Internet de las cosas, el detalle de sus características es la siguiente [11]:

Microcontrolador STM32F103CB - ARM Cortex M3 de 32 bits.

Frecuencia de operación de 72Mhz, 1,25 DMIPS / MHz (Dhrystone 2.1)

Memoria flash de 128 KB

SRAM de 20 KB

ADC de 12 bits

Interfaz USB 2.0 full-speed

Interfaces I2C, USART y SPI

Modo de depuración JTAG

Módulo CC3000 de TI para la comunicación WiFi.

Memoria flash externa 2Mb basada en el chip SST25VF016B.

Regulador de voltaje.

18 pines de Entrada/Salida: D0 a D7, A0 a A7 y dos predeterminados TX y RX.



Fig. 3. Módulo Spark Core

El Spark Core se utilizó, por su capacidad para recibir y mandar información a la nube, además de sus capacidades eléctricas y su facilidad de programación para el desarrollo de diversas aplicaciones, los puertos de salida son suficientes para el desarrollo de este sistema, teniendo la capacidad de manipular hasta 8 cargas.

#### IV. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA

Una vez concluido el diseño del sistema se procedió a la implementación del prototipo, para la cual se tomaron las siguientes consideraciones:

El consumo energético será determinado a partir de la medición de la potencia consumida por el sistema, tomada por el sensor de corriente.

Los parámetros eléctricos como la potencia y el consumo energético se calcularán por software analíticamente aplicando ecuaciones ya establecidas teóricamente.

Para la gestión del sistema vía remota se utilizarán los servicios de la nube proporcionados por el fabricante, que permite publicar hasta 10 variables.

Se debe proporcionar una herramienta visual amigable para el usuario, la cual brindará información en tiempo real del sistema y permitirá la interacción con el mismo. Para ello se creará una página html con funciones JavaScript.

La acción proactiva del sistema se realizará mediante módulos de relay que controlarán el encendido y apagado de las diferentes cargas.

##### A. Algoritmos

Los algoritmos utilizados en el sistema se dividieron en dos etapas: la primera etapa consistió en la parte del código que era ejecutado constantemente en un lazo infinito, y que correspondía a todos los cálculos de las variables eléctricas establecidas en el diseño. La segunda etapa en las funciones de interacción con la nube de forma bidireccional, a fin de publicar los resultados de la medición y recibir las acciones de control.

La figura 4 muestra el flujograma del algoritmo general utilizado para la primera etapa.

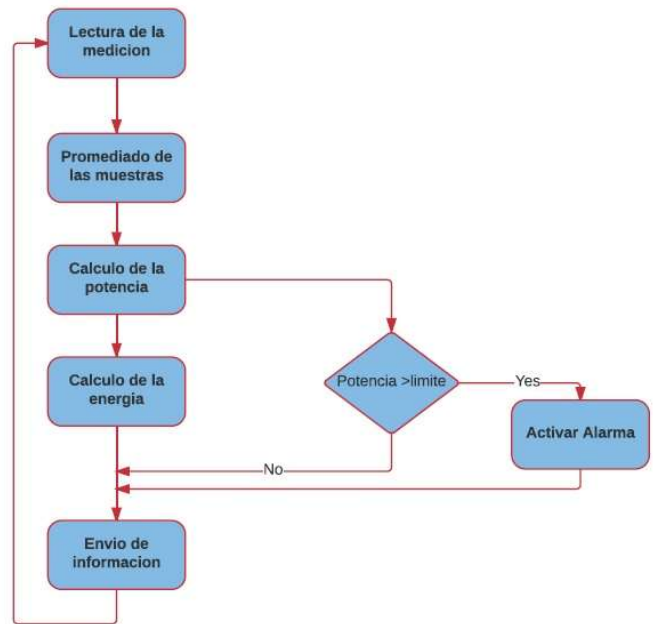


Fig. 4. Flujograma de primera etapa

Como se puede apreciar en la figura anterior el algoritmo es ejecutado secuencialmente comenzando por la lectura de la medición del sensor de corriente, esta lectura se realizaba constantemente por lo que la variación constante de los datos provocaba errores de medición. Para eliminar parte del ruido se procedió a promediarla para obtener un margen de tolerancia. Una vez obtenido el dato de corriente se aplicó las fórmulas para el cálculo de la potencia y la energía.

El flujograma de la figura 5 representa de forma general la interacción de la nube con el dispositivo:

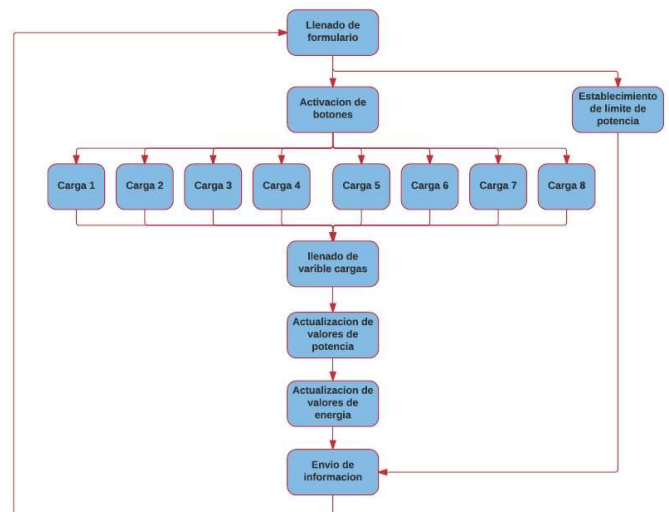


Fig. 5. Flujograma de segunda etapa

En esta etapa se puede apreciar la acción que toma el programa a la hora de recibir el comando requerido para la activación y desactivación de cargas. Al igual que el flujograma anterior los datos son enviados y recibidos desde la nube de forma asíncrona, dándole la facilidad de poder determinar cuándo se requiere leer o enviar información, es natural considerar que dependiendo de la congestión de la red, las tareas de acción sobre las cargas pueden implicar breves retrasos, para minimizar este efecto es conveniente que los nodos IoT se ubiquen en redes separadas, con una adecuada tecnología de calidad de servicio.

### B. Interfaz de usuario y la nube

Para una cómoda interacción entre usuario y sistema se desarrolló una página web, en la cual se presenta de forma ordenada y detallada la información obtenida en la medición de potencia instantánea, consumo energético en un intervalo de tiempo, alarma de límite de potencia sobrepasado, además se presenta el estado de cada una de las cargas conectadas al sistema, y se agregan botones para la manipulación a remota de las cargas según lo decida el usuario. La página es de uso práctico y tiene la capacidad de actualizarse cada 10 segundos, la página fue creada mediante el uso de HTML y el refrescamiento de la información se logra mediante el uso de funciones Java Script, la figura 6 muestra la interfaz de usuario de la página.

El mecanismo para interactuar con la nube se realizó mediante un dispositivo con conexión WiFi de esa manera se pueden enviar y recibir información con lo que se puede gestionar en tiempo real el medidor y las cargas desde cualquier computadora o móvil conectado a Internet.

El mecanismo para interactuar con las cargas se realizó mediante módulos de relés, los cuales son compatibles con dispositivos digitales y son capaces de conmutar cargas de hasta 220 vac. Cada salida digital es capaz de activar o desactivar una carga.

## V. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

### A. Entorno de prueba

El entorno de prueba se realizó con conexiones reales, simulando una instalación eléctrica de un hogar, con los aparatos eléctricos que comúnmente se utilizan (Radio, Ventilador, Luminarias, etc.). Las instalaciones operaban a un voltaje aproximadamente de 114 Vac lo cual fue considerado en el programa como constante de entrada. Se realizaron diversas pruebas en las que se activaban y se desactivaban cargas comparando los valores teóricos de la potencia de las diferentes cargas y los valores medidos por el sistema, obteniendo resultados muy aproximados, con poco porcentaje de error.

Además se desarrollaron pruebas de control de dispositivos de potencia media-alta para ver el comportamiento de diferentes tipos de cargas (resistivas, capacitivas, inductivas), y los diferentes picos de corriente que estos generaban.

## Medidor de potencia

Waiting for data...								
Energia:							Iniciar	Parar
Waiting for data...								
Nuevo Limite:							Cambiar	
0								
Estatus de las cargas: ----								
Luz1	Luz2	Luz3	Luz4	Ventilador	Radio	Cargador	Cautin	
Encender	Encender	Encender	Encender	Encender	Encender	Encender	Encender	
Apagar	Apagar	Apagar	Apagar	Apagar	Apagar	Apagar	Apagar	

Fig. 6. Interfaz de usuario para gestión del sistema a través de una página web.

### B. Limitaciones

La principal limitación para las pruebas del módulo fue que no se trabajó sobre una red dedicada, para así evitar que el tráfico del módulo IoT no se mezclara con el del resto de nodos, lo cual puede afectar grandemente si la densidad de conexiones es muy grande. Otra limitante fue el número de puertos físicos disponibles que brinda el módulo IoT, con lo que si se desea controlar un mayor número de cargas será necesario separar el control de puertos en un procesador separado.

Por último esta la limitación del número de variables que se pueden estar enviando y recibiendo de la nube, ya que entre más variables se utilicen es menos óptimo el funcionamiento del sistema y presenta retardos bastante considerables.

### C. Trabajos a futuro

Las soluciones previstas a estos inconvenientes son: contar con una conexión estable a internet evitando retardos con técnicas de calidad de servicio, utilizar la técnica de multiplexado para poder contar con más puertos I/O con otro microcontrolador, para la limitación en la nube se puede desarrollar mecanismos para compactar la trama de comunicación a fin de reducir las funciones o variables que se publican o bien considerar un modelo de procesamiento en la niebla a fin de pasar parte de las variables a otro procesador[13].

Para trabajos futuros se plantea el estudio de nuevos dispositivos de desarrollo de aplicaciones con conexión a internet que tengan cada vez más estabilidad de conexión, más potencia de procesamiento y mejoras en características eléctricas; así como se propone utilizar componentes que reduzcan el porcentaje de error en cuanto a la medición; también se plantea mejorar la página web para que sea más atractiva al usuario y permita una gestión más personalizada y privada, manteniendo su funcionalidad [14].

## VI. CONCLUSIONES

Los módulos IoT permite escalar las capacidades de soluciones de medición, con lo que se pueden aportar más servicios que hagan más eficiente la gestión de energía al poder generar un impacto en el estado del consumo en tiempo real.

Los resultados de las mediciones hechas con el banco de pruebas que se desarrollo muestran una precisión suficiente para una solución comercial y a un costo relativamente bajo. Los tiempos de respuesta de las acciones ejercidas en las cargas no superan los 18 segundos en redes congestionadas, el principal inconvenientes es la intermitencia de la conexión la cual provoca retrasos por el tiempo de sincronización a la nube del módulo el cual puede ser considerablemente alto en redes muy congestionadas, por lo que para soluciones comerciales y tal como lo indican las topologías para Internet de las cosas estos módulos deben separarse en redes dedicadas con un adecuado sistema de calidad de servicio.

## REFERENCIAS

- [1] M. Venables, "Smart Meters Make Smart Consumers [Analysis]", *Engineering & Technology*, 2(4), 23, 2007.
- [2] J.L Jaramillo, "La gestión de energía desde una perspectiva sistematica," Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, May. 2010.
- [3] J.J Cáceres, "Monitor visual del consumo de energía eléctrica en viviendas," Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Santa Tecla, El Salvador, Mar. 2010.
- [4] Fluke Corporation 1995-2016 Disponible en: <http://www.fluke.com/fluke/sves/soluciones/calidad-potencia/>
- [5] PCE Iberica S.L Disponible en: [https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-potencia-kat\\_70097\\_1.html](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-potencia-kat_70097_1.html)
- [6] J.L Hurtado, J.C Arias, E.A Quintero, "Medidor electrónico interactivo de consumo de energía eléctrica para uso residencial", *Prospect*, vol. 14, no. 1, pp. 62-64, En. 2016.
- [7] OpenEnergyMonitor, "CT sensors interface with an Arduino", <https://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/ct-sensors-interface>.
- [8] G.O Plata, C. Duarte, A. Bautista, "Análisis de la medición de potencia y energía eléctrica en contadores digitales en distintas formas de conexión, bajo los efectos de armónicos y cargas desbalanceadas", *Clepsidra*, vol. 3, no. 4, pp. 101-103, Feb. 2007.
- [9] G.E Gonzales, G.O Plata, A. Bautista, J.G. Barrero, C. Duarte, "Medición de las magnitudes potencia y energía eléctrica bajo las nuevas condiciones de los sistemas eléctricos", *UIS Ingenierías*, vol. 1, no. 1, pp. 12-14, Jun. 2009.
- [10] Hoja de datos de sensor de corriente disponible en: <https://nicegear.co.nz/obj/pdf/SCT-013-datasheet.pdf>
- [11] Hoja de datos de Spark Core disponible en: <https://docs.particle.io/datasheets/core-datasheet/>
- [12] W.A. Pérez, J.M. Quiroga, O.F. Romero, "Diseño e implementación de un prototipo de contador de energía trifásico utilizando un procesador de señales digitales DSP" M.S. tesis, Escuela Ing. Electrónica, Universidad Industrial de Santander., Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] International Energy Agency. *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency*. 94. 2008.



**Ernesto Antonio Cárcamo Aguilar** nació en San Salvador, El Salvador, el 10 de mayo de 1991. Se graduó del Instituto Técnico Ricaldone, de Bachillerato Técnico en Electrónica (2005-2010). Graduado de Técnico en Electrónica en la Universidad Don Bosco Soyapango, El Salvador, (2011-2012) Actualmente estudia quinto año de Ingeniería Electrónica en la Universidad Don Bosco, Soyapango.



**José Misael Crespín Hernández** Nació en la ciudad de San Salvador, El Salvador, el 4 de Enero de 1987. Graduado en Técnico en Ingeniería en Telecomunicaciones en el ITCA. Actualmente estudia último año de ingeniería electrónica en Universidad Don Bosco, Soyapango



**Néstor Aquiles Hernández Guzman** Estudiante de Ingeniería Electrónica, nacido en San Salvador el 11 de abril de 1993. Realizo sus estudios de bachillerato en el Colegio Externado de San José del cual recibió banda de perseverancia y título de bachiller general. Actualmente cursa último año de su carrera en la Universidad Don Bosco esperando graduarse y ser un ingeniero proactivo.



**Carlos Bran:** Director del Instituto de Investigación e Innovación en Electrónica, Graduado de Ingeniero Electricista, Postgrado en Gestión Tecnológica, Maestría en Investigación en Tecnologías de la información y estudios Doctorales en el Centro Singular de Investigación en Tecnologías de la Información CITIUS. Experiencia laboral incluye empresas como Dymel, Dynamo, AT&T, diversas compañías en

el área de las telecomunicaciones, Decano de la facultad de ingeniería de la Universidad Don Bosco Director del programa Cisco Networking Academy, entre otras.

Profesor de sistemas embebidos, diseño electrónico, redes de computadoras y seguridad informática, los intereses de investigación incluyen áreas relacionadas con los sistemas embebidos, Internet de las Cosas, diseño de ASIC, protocolos de comunicación, sistemas paralelos, energy harvesting y visión por computadora.