

**MÓDULO ELECTROMECAÁNICO
PARA BALANCEO DE CARGAS EN
LÍNEAS TRIFÁSICAS MEDIANTE
UNA RED DE SENSORES**

**ELECTROMECHANICAL MODULE
FOR BALANCING OF LOADS IN
THREE-PHASE LINES THROUGH
A SENSOR NETWORK**

**MÓDULO ELECTROMECAÁNICO
PARA CARREGAS DE EQUILÍBRIO
EM LINHAS TRIFÁSICAS
ATRAVÉS DE UMA REDE DE
SENSOR**

Diana Riscanevo Espitía

Escuela de Posgrados de Ingeniería,
Grupo de Investigación INFELCOM, UPTC
dianayriscanevo07@hotmail.com

Oscar Bellon Hernández

Facultad de Estudios a Distancia, Grupo
de Investigación TICA, UPTC
oscar.bellon@uptc.edu.co

Germán Amezquita Becerra

Escuela de Posgrados de Ingeniería,
Grupo de Investigación INFELCOM, UPTC
german.amezquita@uptc.edu.co

*Fechas de recepción: 21 de junio 2017
Fecha aprobación: 01 de septiembre 2017*

Resumen

Este documento describe el proceso de diseño y montaje de un sistema que combina un circuito electrónico con relés electromecánicos para conmutar la conexión entre las 3 fases que alimentan 3 circuitos de carga monofásicos con resistencias en paralelo. El módulo se diseñó, entendido como un sistema con 3 etapas: control, conmutación y sensores de corriente. Una 4ª etapa de comunicación puede inferirse a partir del hecho de que el módulo puede conectarse tanto por protocolo USB como por BLUETOOTH. Este trabajo reporta el primer avance en el desarrollo del proyecto DISEÑO DE UNA APLICACIÓN ANDROID PARA EL MONITOREO Y CONTROL REMOTO DE UNA RED INTEGRADA DE SENSORES, cuyo objetivo principal es implementar un programa a nivel de aplicación móvil para facilitar el balance de cargas en redes trifásicas mediante monitoreo remoto.

Palabras clave: Balance de cargas, conmutación de fases.

Abstract

This document describes the process of design and assembly of a system that combines an electronic circuit with electromechanical relays to switch the connection between the 3 phases that feed 3 single-phase load circuits with resistors in parallel. The module was designed as a system with 3 stages: control, switching and current sensors. A fourth communication stage can be inferred from the fact that the module can be connected both by USB protocol and BLUETOOTH. This work also reports the first advance in the development of the project DESIGN OF AN ANDROID APPLICATION FOR THE MONITORING AND REMOTE CONTROL OF AN INTEGRATED SENSOR NETWORK, which main objective is to implement a program at the mobile application level to facilitate the balance of charges in three-phase networks through remote monitoring.

Keywords: Load balance, phase switching.

Resumo

Este texto descreve o processo de desenho e montagem de um sistema que combina um circuito eletrônico com relés eletromecânicos para comutar a conexão entre as 3 fases que fornecem 3 circuitos de carga monofásicos com resistências em paralelo. O módulo foi projetado como um sistema de 3 etapas: controle, comutação e sensores de corrente. Uma quarta etapa de comunicação pode se inferir do fato que o módulo pode se conectar, tanto por protocolo USB quanto por BLUETOOTH. Este trabalho reporta o primeiro avanço no desenvolvimento do projeto de que faz parte e cujo objetivo principal é implementar um programa nonível de aplicação móvel que facilite o balanço de cargas trifásicas mediante monitoramento remoto.

Palavras chave: Balanço de cargas, comutação de fases.

I. INTRODUCCIÓN

El balance de cargas en una red trifásica para distribución de potencia eléctrica es la búsqueda de la distribución más equitativa posible de potencia promedio entre las líneas. En los sistemas de transmisión de energía, se cuenta con 3 líneas denominadas fases, que tienen voltajes armónicos con desfase angular entre ellas de 120° grados eléctricos, pero con la misma amplitud (En condiciones ideales). Las cargas trifásicas balanceadas son aquellas que consumen la misma potencia promedio, tanto activa como reactiva, durante intervalos de tiempo relativamente largos (Exposito, Gomez-Exposito, Conejo, & Canizares, 2016).

Sin embargo, en las instalaciones, tanto domiciliarias como industriales, e incluso a nivel de subestaciones eléctricas, se presenta una variabilidad difícil de predecir. Cada línea surte energía a un conjunto heterogéneo de consumidores con necesidades diferentes. De hecho, a nivel domiciliario, las redes son en su mayoría monofásicas, pero cada una estará conectada a una fase diferente, proveniente de la subestación. Dentro de las ciudades y las poblaciones, los circuitos locales se tratan de conectar cumpliendo ciertos criterios de distribución de carga, que son resultado de estimaciones a partir de estadísticas de consumo (Carvajal & Jiménez, 2013).

A nivel industrial, es común el uso de las 3 fases, pues la demanda de energía es superior. Las plantas de procesos industriales requieren de la operación de equipo y maquinaria con alta demanda de consumo eléctrico (Estrada, Isabel, Arango Aramburo, Álvarez, & Guillermo, 2012). Ciertos componentes demandan de un suministro energético durante las 24 horas, como, por ejemplo, las máquinas para transformación de materia prima, hornos

industriales, entre otros. Pero también hay instancias corporativas donde la tasa de consumo es determinada por el horario, como los equipos de cómputo del personal de oficina, fotocopiadoras, televisores, etc.

Debido a la resistividad de los cables conductores en las líneas de transmisión de energía, existe un consumo de potencia que se disipa como calor y que es proporcional al cuadrado de la corriente media cuadrática (I_{rms}). Es inevitable que se presente calentamiento en los cables y alambres conductores. El incremento de temperatura puede llevar al deterioro gradual del metal y en condiciones de sobrecarga, hay destrucción de la línea. Este factor es mayor en sistemas de distribución de potencia (SEP) centralizados, donde los trayectos son extensos (Sevilla & Fernández, 2013).

La vida útil de las líneas de transmisión puede extenderse en la medida que se distribuye la carga de la forma más equitativa posible entre las fases. Los sistemas de balanceo de carga buscan mecanismos que permitan conmutar circuitos entre fases (Brea, 2016; Mathieu, Koch, & Callaway, 2013; Yan & Saha, 2012). Los desbalances de carga acarrearán problemas serios como: reducción de voltajes y pérdida de la simetría de onda, fluctuaciones y pérdida de la confiabilidad del servicio. La búsqueda de una corriente efectiva equitativamente distribuida sería la forma más simple de minimizar los efectos nocivos del desbalance de cargas. Los voltajes de fase o los de línea no son las variables principales para el monitoreo porque en condiciones de carga normal, la diferencia de potencial es mayor entre los terminales del circuito de carga que la que está presente entre los dos extremos de una línea conductora. Excepto en la situación de corto circuito.

Los sistemas de distribución de potencia eléctrica cuentan con mecanismos de protección ante sobrecargas o sobretensiones. Sin embargo, el desbalance entre fases no constituye una situación extrema porque no implica inminencia de falla sino, como se mencionó antes, por las situaciones de variabilidad, pérdidas en los sistemas de distribución y en la calidad del sistema eléctrico (Brea, 2016). Ante la variabilidad de la potencia demandada, los problemas de calidad y confiabilidad en una red jerarquizada, el concepto de redes inteligentes (Smart Grid) ha establecido un nuevo paradigma basado en la adquisición y procesamiento de los datos relevantes de la red en tiempo real. Las redes Smart Grid en realidad son la aplicación de tecnologías que convergen hacia el mejoramiento de la distribución de energía eléctrica e incluso, permitiendo incorporar servicios adicionales como comunicación y datos (Micheloud & Vicini, 2012; Ortega, 2012; Sevilla & Fernández, 2013). Este panorama es prometedor para las aplicaciones que pretenden resolver problemas en las redes de distribución y por supuesto, para el caso particular del balance de cargas.

En la comunidad científica los esfuerzos se concentran, por ejemplo, en compensar el

desequilibrio de cargas mediante la inyección de potencia reactiva utilizando control vectorial (Rastegar, Saradarzadeh, Farhangi, & Zare-Sakhvidi, 2017) o con algoritmos para modificar la capacitancia individual de los componente de un banco de condensadores para deshacerse de las corrientes producto del desbalance (Ghorbani, Bina, & Babadi, 2017). En el medio local, los desbalances de carga se tratan conmutando manualmente circuitos de una fase a otra.

Una solución intermedia que reduce el peso computacional de las soluciones más sofisticadas pero que no recurre a los medios manuales puede encontrarse con un sistema de conmutación de fases que combine la sencillez y robustez de los relés electromecánicos con la rapidez de respuesta de los dispositivos programables. El objetivo general del proyecto de investigación dentro del cual este trabajo corresponde a un primer avance, es la reducción del desbalance de cargas mediante la conmutación de fases realizada de forma automatizada como resultado de evaluar el consumo instantáneo de potencia en una red de distribución eléctrica de 4 hilos. Una visión global puede explicarse mediante la Fig. 1:

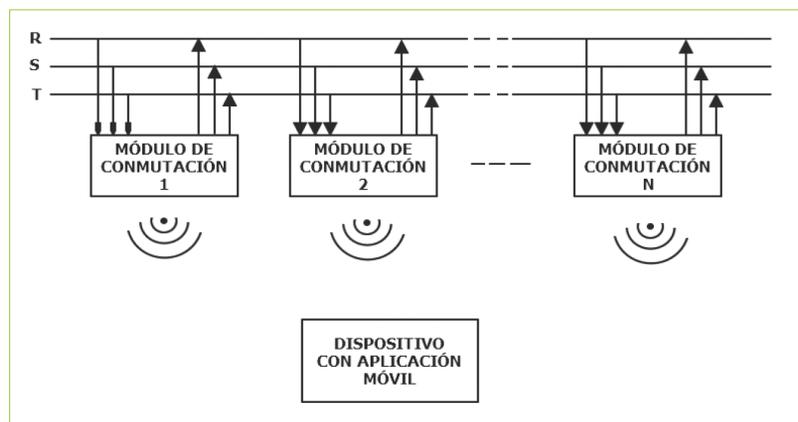


Fig. 1. Red de módulos de conmutación de fases para distribución equitativa de carga en una red de múltiples abonados.

Fuente: Autores.

En el diagrama de bloques (Fig. 1) se ilustra una red de sensores de corriente eficaz en la que cada módulo de conmutación puede intercambiar la conexión de mínimo 3 circuitos. En términos prácticos, cada módulo está conectado a una red que puede ser industrial, comercial o residencial. La cantidad de cargas individuales que podrá ser acoplada está limitada por las necesidades particulares de consumo de potencia y de la cantidad máxima de cargas individuales que se acoplen a esa red con la opción de intercambiar fase.

Cada módulo será un sistema con capacidad de procesamiento computacional, con un control distribuido, donde cada nodo contará con un procesador central que permitirá establecer la comunicación con otros dispositivos, incluso con capacidad de procesamiento superior. La comunicación será realizada mediante un protocolo de comunicación inalámbrica, entre los nodos de la red de módulos y el dispositivo central. En este orden de ideas, se está hablando de una red de sensores distribuidos, en donde cada nodo registra como variable ambiental, la corriente de sus circuitos de carga y a la vez, la de la red de potencia eléctrica principal de la que se surten (Li & Thai, 2008). El dispositivo con la aplicación móvil ejecutará un programa para el monitoreo y control de la configuración de las conexiones de los relés en cada módulo, a partir de los datos recabados de todos los nodos. La presencia de un procesador central, preferiblemente un teléfono inteligente, por criterios de comodidad y de disponibilidad, que permita la operación de intercambio de fases de los circuitos de carga individuales, se da porque los nodos no tienen acceso a los datos de corriente de los circuitos de carga de los demás módulos. La información total se gestiona desde la aplicación móvil que permitirá

al usuario tener un panorama general de toda la red para tomar decisiones mejor fundadas.

Las redes de sensores ya se han utilizado en el país para resolver problemas de sectores productivos o en condiciones de vulnerabilidad (Romero Acero, Marín Cano, & Jiménez Builes, 2013). Es una alternativa a la medida de la problemática planteada hasta este punto y que puede ser solucionada efectivamente.

Este documento tiene como objetivo plantear el diseño del hardware del módulo de conmutación básico para intercambio de fase entre redes monofásicas y principalmente, realizar una prueba de transmisión de datos hacia un dispositivo que los reciba vía inalámbrica. Se describe cada circuito como forma de implementar las funciones iniciales de: configuración de relevadores para intercambio de fase entre circuitos de carga, detección y registro de la corriente efectiva por fase y activación de la configuración del sistema de relés. El módulo de conmutación es uno de los componentes del sistema y es la primera etapa en el desarrollo del proyecto cuyo diagrama de bloques se aprecia en la Fig. 1.

II. METODOLOGÍA

En esta sección se procede a detallar el módulo de conmutación, en cuanto a las etapas que lo componen, desde un punto de vista funcional. El módulo de conmutación de fase para balanceo de cargas que se expone en este trabajo, está constituido por las siguientes etapas:

- *Control:* donde serán recibidas las señales que contienen el registro del valor de corriente por cada fase para transmitir al dispositivo con la aplicación móvil vía inalámbrica y que emite las salidas necesarias para configurar la red de contactos del relé.

- *Sensores de corriente*: conjuntos de elementos para detección, adecuación y registro de la corriente efectiva instantánea.
- *Potencia*: la red de relés electromecánicos cuyas salidas conmutan de posición para intercambiar la conexión de los circuitos de carga monofásicos con alguna de las fases.
- *Circuitos de carga*: cada uno de las cargas utilizadas como circuitos de prueba. Son redes monofásicas resistivas puras.

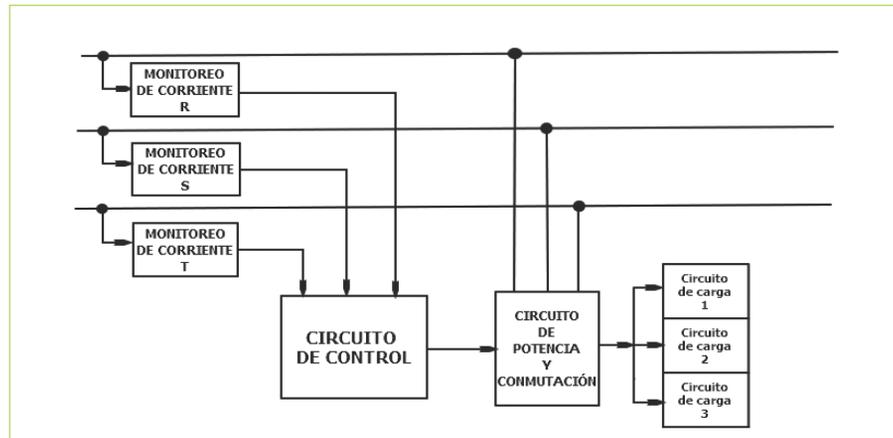


Fig. 2. Diagrama de bloques funcional del sistema para conmutación de fases para balanceo de cargas monofásicas.

Fuente: autores.

En la Fig. 2, se considera un circuito de conmutación con tres cargas. La utilidad del sistema de balanceo de cargas es mayor cuanto mayor sea el número de circuitos individuales que se pueden conmutar.

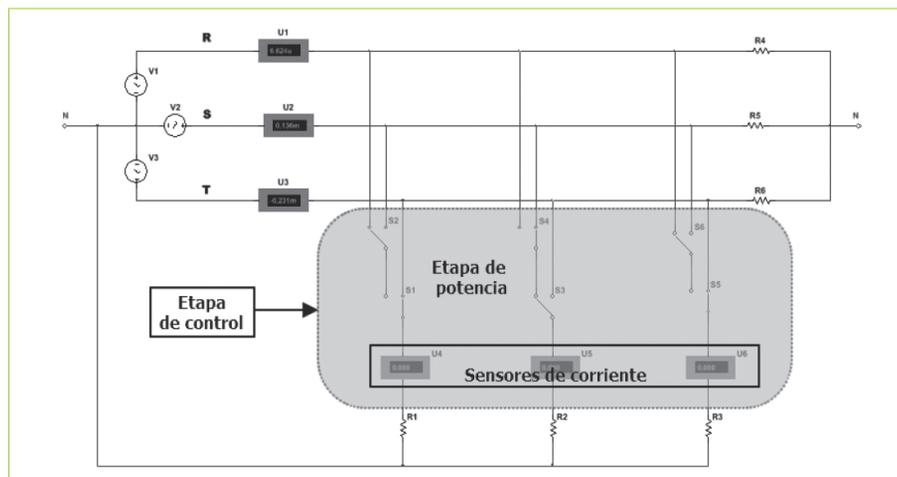


Fig. 3. Circuito equivalente para simular la acción de conmutación de 3 cargas resistivas, controladas por un módulo.

Fuente: Autores.

Para comparar cuantitativamente la acción de balanceo se recurre al circuito de prueba mostrado en la Fig. 3, donde R_1 , R_2 y R_3 las resistencias, y representan la carga equivalente de un circuito individual con posibilidad de conmutar entre fases.

Las resistencias R_4 , R_5 y R_6 , y son las cargas equivalentes del resto de la red. La aplicación en el dispositivo móvil recibe información en tiempo real de la corriente eficaz en las líneas de suministro principal y mediante la información recibida inalámbricamente del módulo, presenta la información gráficamente al usuario para que sea quien decida cómo distribuir las cargas. Opcionalmente, se puede ejecutar un algoritmo que decide cómo configurar la acción de los relés para lograr equilibrio de corriente en la red.

Para el diseño y simulación de los circuitos se utilizará el programa *Proteus*® así como para la elaboración de los circuitos impresos.

III. RESULTADOS

Para implementar el sistema modular es necesario especificar el hardware que lleva a cabo cada una de las fases.

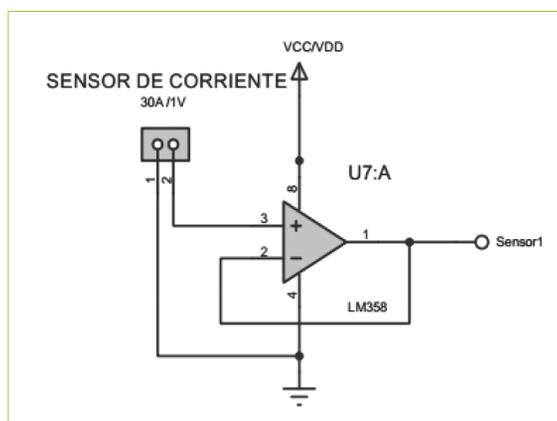


Fig. 4. Circuito para adecuación de señal del sensor de corriente no invasivo SCT-013-030.

Fuente: autores.

La Fig. 1, es el diagrama de bloques del sistema general. Cada una de las fases R , S y T es monitorizada por un sensor de corriente no invasivo *SCT-013-030* que tiene un factor de escala de $(1V/30A)$. El sensor tiene 2 terminales para conectar al circuito de acondicionamiento, que se muestra en la Fig. 4.

Circuito de control

El circuito electrónico está contenido en una tarjeta comandada por un microcontrolador *PIC18F4550* que registra periódicamente la corriente eléctrica en cada una de las fases y en cada uno de los 3 circuitos monofásicos resistivos de prueba, a partir de las señales enviadas desde la etapa de potencia.

La Fig. 5, muestra el diagrama esquemático de conexiones del microcontrolador *PIC18F4550* hacia los demás componentes en las otras etapas. El *PIC18F4550* ofrece además la posibilidad de interconectar el sistema a través de comunicación *BLUETOOTH* y *USB* para acción interactiva con otros módulos o la posibilidad de establecer protocolo maestro-esclavo con otros dispositivos programables. El programa embebido registra la corriente de cada uno de los circuitos individuales, recibe el dato, lo empaqueta en una trama de acuerdo al protocolo utilizado y lo envía al transceptor de comunicación inalámbrico. De igual forma, el transceptor recibe información del dispositivo móvil con la aplicación que contiene un tren de datos con la información sobre la forma en que deben estar configurados los relés para lograr un reparto equitativo de la corriente en toda la red. El microcontrolador genera las señales que luego son amplificadas y transferidas por transistor a cada uno de los relés individuales. En condición de máximo consumo de potencia,

cada circuito presenta la misma resistencia equivalente y las 3 fases pueden suministrar la misma corriente a 2 circuitos de prueba

simultáneamente. El sistema en funcionamiento tendrá inicialmente, conexión de 3 cargas monofásicas resistivas.

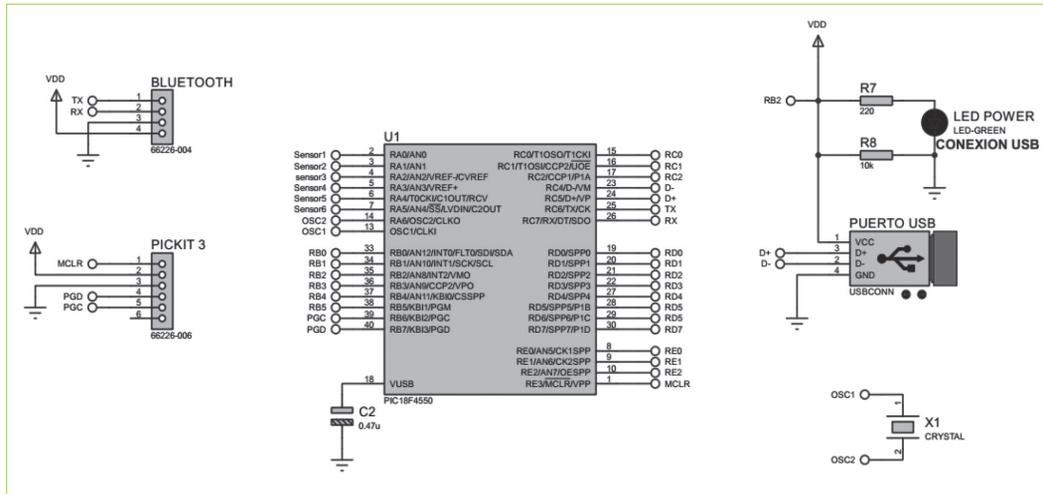


Fig. 5. Diagrama de circuito para implementación de la etapa de control.

Fuente: Autores.

Etapa de potencia

En la Fig. 6, se observa la configuración de los relés electromecánicos para dar la opción de conectar el circuito de carga a cualquiera de las fases. La configuración es similar para los otros 2 circuitos monofásicos de prueba. La etapa de potencia y conmutación está constituida por 2 relés electromecánicos por cada circuito de carga. La bobina de cada relé es controlada por un transistor *TIP31C* que puede manejar cargas de mediana potencia y que supera las especificaciones del relé de 5V conectado en su terminal de colector.

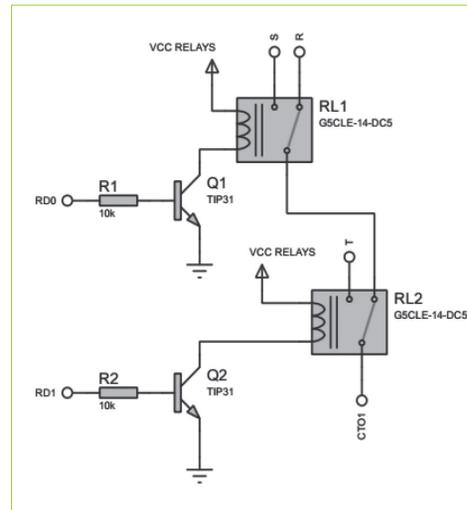


Fig. 6. Circuito para conmutación de fase de cada circuito de carga.

Fuente: Autores.

Cada terminal *CTO1*, *CTO2* ó *CTO3*, a su vez, está alimentando a varias cargas monofásicas resistivas, que, para el caso particular de este trabajo, fueron lámparas incandescentes. La Fig. 7, muestra la forma como están conectadas las cargas:

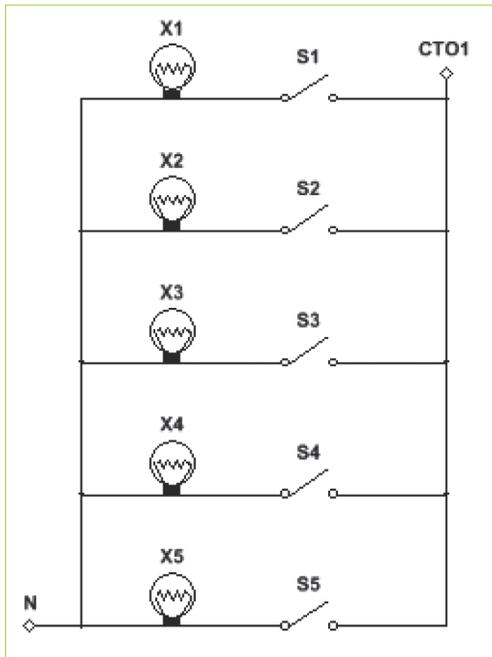


Fig. 7. Circuito de carga para prueba de balance por cada fase.

Fuente: Autores.

Cada lámpara incandescente puede conectarse y desconectarse para representar en un momento dado un nivel de consumo de entre 5 valores posibles.

En la Fig. 8, se muestra la apariencia proyectada de la tarjeta, una vez estén todos los componentes. Todas las etapas ya descritas quedarán en un solo circuito impreso. El montaje en físico se aprecia en la Fig. 9.

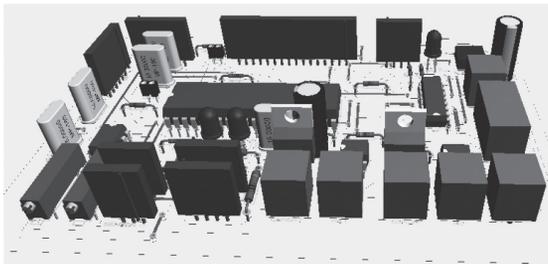


Fig. 8. Vista tridimensional de la tarjeta del circuito para intercambio de fases.

Fuente: Autores.

El hardware que hasta este punto se ha descrito permite ejecutar una disposición particular de interconexión entre las fases y los subcircuitos, con un tiempo de reacción menor que el que tendría un operador humano accionando los contactos manualmente.

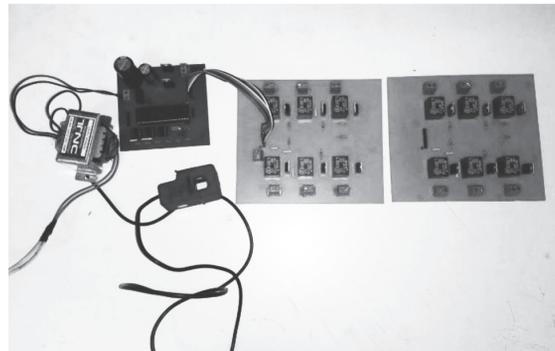


Fig. 9. Montaje físico de los circuitos que componen el módulo de conmutación.

Fuente: Autores.

Para establecer la comunicación inalámbrica, se utilizó un módulo Bluetooth HC-05 (Fig. 10). La configuración de la comunicación y las conexiones a microcontrolador se basaron en un manual disponible en línea ("istd016A.pdf", s/f).

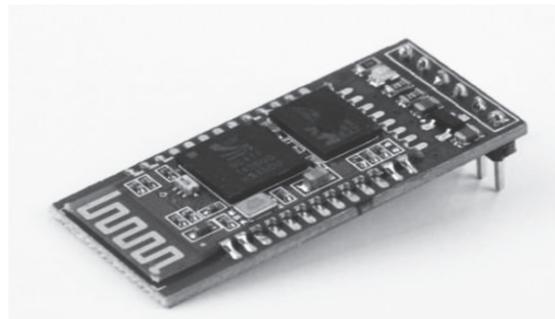


Fig. 10. Módulo para comunicación Bluetooth HC-05. Fuente: <http://trobotica.co/bluetooth-modem-hc-05/72.html>

Fuente: autores

Se configuró una velocidad de transmisión de y se desarrolló una aplicación en App

Inventor (“MIT App Inventor | Explore MIT App Inventor”, s/f) en un teléfono inteligente con sistema operativo Android. Los datos transmitidos contenían los valores de corriente eficaz en cada fase (Fig. 11). Las pruebas se realizaron utilizando un solo sensor de corriente y se verificaron con una pinza amperimétrica. En la Fig. 12 se muestra la evidencia de la prueba de transmisión realizada.

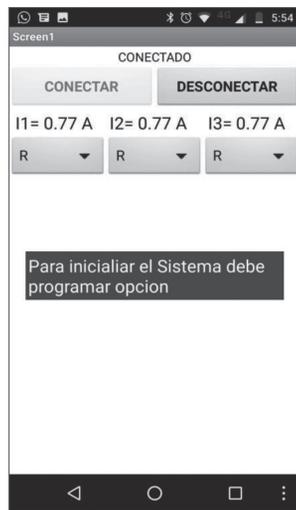


Fig. 11. Interfaz en App Inventor desarrollada para recibir datos transmitidos por el módulo de conmutación vía Bluetooth.

Fuente: Autores

Fig. 12. Registro gráfico de la prueba realizada para comprobar la transmisión por Bluetooth desde el módulo de conmutación hacia la aplicación en el dispositivo móvil con Android.



Fuente: Autores.

IV. CONCLUSIONES

El hardware que se diseñó y describió en este trabajo, permitió conectar 3 circuitos con múltiples cargas monofásicas, intercambiando la fase alimentadora mediante la acción de un dispositivo programable, en función de las variaciones de la corriente eficaz medida en cada una de las líneas de alimentación principal. El tiempo de conmutación de una línea a otra deberá ser un factor a analizar para determinar el tipo de cargas a atender y las medidas adicionales para que, en ese tiempo de intercambio, el circuito de carga no presente una variación que pueda comprometer el estado de los elementos individuales que estén conectados.

La incorporación de un dispositivo programable con capacidades de intercambio de información mediante protocolos *USB* y *BLUETOOTH*, brinda la posibilidad de establecer comunicación con otros módulos, con equipos de cómputo en los que se podrá ejecutar algún programa para gestión automatizada de la operación de conmutación o incluso con pasarelas entre protocolos para llegar a teléfonos inteligentes con aplicación móvil, cómo es el objetivo del proyecto al que este trabajo corresponde. En cualquiera de los dispositivos inteligentes que puedan recibir la información del microcontrolador del módulo, puede residir una aplicación para analizar la información del módulo individual y también recibir información de otros módulos para aplicar un algoritmo de análisis que seleccione la mejor configuración de conmutación entre los diferentes módulos para luego enviar inalámbricamente, la secuencia de combinaciones a los diferentes nodos de la red, para implementar la configuración con menor desbalance de carga.

La aplicación en el dispositivo móvil será tratada en un trabajo futuro. Con el primer paso realizado se demuestra que es posible utilizar un sistema de monitoreo remoto de corriente para enviar información sobre una variable particular. En este caso, corriente eficaz.

V. REFERENCIAS

Brea, E. (2016). Optimización de balance de cargas en sistemas de distribución de energía eléctrica. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 24(3). Recuperado agosto 14, 2017, a partir de <http://revistadelafacultaddeingenieria.com/index.php/ingenieria/article/view/386>

Carvajal, S., & Jiménez, J. D. M. (2013). Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de potencia colombiano: un enfoque dinámico. *Revista Tecnura*, 17(35), 77–89.

Estrada, R., Isabel, M., Arango Aramburo, S., Álvarez, V., & Guillermo, L. (2012). LA CONFIABILIDAD EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS COMPETITIVOS Y EL MODELO COLOMBIANO DE CARGO POR CONFIABILIDAD. *Cuadernos de Economía*, 31(56), 199–222.

Exposito, A. G., Gomez-Exposito, A., Conejo, A. J., & Canizares, C. (2016). *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*. CRC Press.

Ghorbani, E., Bina, M. T., & Babadi, A. N. (2017). Capacitor voltage balancing and circulating current suppression of modular multi-level converters under unbalanced load condition. *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 1417–1422). Presentado en 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE).

istd016A.pdf. (s/f). . Recuperado septiembre 18, 2017, a partir de <http://www.electronicastudio.com/docs/istd016A.pdf>

Li, Y., & Thai, M. T. (2008). *Wireless Sensor Networks and Applications*. Springer Science & Business Media.

Mathieu, J. L., Koch, S., & Callaway, D. S. (2013). State Estimation and Control of Electric Loads to Manage Real-Time Energy Imbalance. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1), 430–440.

Micheloud, O. M., & Vicini, R. A. (2012). *Smart Grids: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones*. Gengage Learning Editores.

MIT App Inventor | Explore MIT App Inventor. (s/f). . Recuperado septiembre 19, 2017, a partir de <http://appinventor.mit.edu/explore/>

Ortega, E. M. I. (2012). Redes de Comunicación en Smart Grid. *Ingenius*, 0(7), 36–55.

Rastegar, M., Saradarzadeh, M., Farhangi, S., & Zare-Sakhvidi, A. (2017). An improved D-SSSC voltage and current load balancing control strategy under unbalanced load. *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 1248–1253). Presentado en 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE).

Romero Acero, Á., Marín Cano, A., & Jiménez Builes, J. A. (2013). Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de alertas tempranas en minas subterráneas: una solución a la problemática de atmósferas explosivas en la minería de carbón en Colombia. *Ingeniería y Desarrollo*, 31(2). Recuperado agosto 14, 2017, a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=85229155003>

Sevilla, A. G. P., & Fernández, F. O. A. (2013). Evolución de las redes eléctricas hacia Smart Grid en países de la Región Andina. *Revista Educación en Ingeniería*, 8(15), 48–61.

Yan, R., & Saha, T. K. (2012). Voltage Variation Sensitivity Analysis for Unbalanced Distribution Networks Due to Photovoltaic Power Fluctuations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(2), 1078–1089.