Monitoreo, control y diagnóstico en bancos de capacitores automáticos en baja tensión

Monitoring, control and diagnostics in automatic capacitor banks at low voltage

William Yero Peña¹ Leuber Rosa Rodríguez^{2*}
Julio Ramírez Bient¹ Pedro García León²

Recibido 8 de julio de 2015, aceptado 29 de mayo de 2017 Received: July 8, 2015 Accepted: May 29, 2017

RESUMEN

Debido a la falta de métodos de diagnóstico y predictivos para evaluar la efectividad de la compensación y predecir la operación crítica de los bancos de capacitores, se producen averías que conllevan a que la corrección del factor de potencia no se realice de forma efectiva. Integrando un sistema de adquisición de datos, un controlador lógico programable, una interface amigable y un protocolo de comunicación Modbus, al realizar las pruebas se obtuvo el aporte de cada escalón y se determinó, de manera indirecta, su efecto sobre la corriente de cada una de las fases. El error relativo obtenido fue de 0,03 kVAr por paso y de 1,6 kVAr para el banco, siendo permisible al ser menor que el margen de efectividad del 75% previsto para considerar que el paso esté averiado o no. La validación del sistema en un banco real en operación, donde las desviaciones del valor esperado estuvieron dentro del margen requerido, permite asegurar su factibilidad para ser aplicado en las instalaciones eléctricas que carecen de un sistema de monitoreo y diagnóstico de los bancos instalados.

Palabras clave: Supervisión eléctrica, monitoreo y control, factor de potencia, banco de capacitores, supervisor SCADA, controladores lógicos programables, analizador de redes.

ABSTRACT

Due to lack of diagnostic and predictive to assess the effectiveness of compensation and predict the critical operation of capacitor banks, failures that lead to the correction of the power factor is not performed so occur effective. Integrating a system of data acquisition, programmable logic controller, a friendly interface and a communication protocol Modbus, when testing, the contribution of each step was obtained and determined, indirectly, its effect on the current of each one phase. The relative error obtained was 0.03 kVAr step and 1.6 kVAr for the bank, being permissible to be less than the margin of effectiveness of 75% expected to consider the step is damaged or not. The validation of the system in a real bank in operation, deviations from the expected value were within the expected range, being feasible to be applied in electrical installations lacking a monitoring and diagnostics of installed banks.

Keywords: Electrical supervision, monitoring and control, power factor, capacitor bank, electric panels, SCADA supervisor, programmable logic controllers, network analyzer.

_

Departamento de Ingeniería Eléctrica. Empresa de Automatización Integral, CEDAI. Carretera Central, S/N, Esquina Martí. Holguín, Cuba. E-mail: yeroholguin@gmail.com; jramirez@cedai.com.cu

² Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica del Norte. Avenida 17 de Julio, 5-21 y Gral. José María Córdova. San Miguel de Ibarra, Imbabura, Ecuador. E-mail: lrosa@utn.edu.ec; pgarcia@utn.edu.ec

^{*} Autor de correspondencia

INTRODUCCIÓN

Hoy en día encontramos fabricantes de diversos países [1-3] que suministran bancos automáticos para compensar la potencia reactiva y mantener el factor de potencia (FP) en un valor óptimo.

Una característica común de todos los bancos automáticos es que utilizan un dispositivo regulador para el proceso de supervisión y control del FP. Estos dispositivos, en sus versiones más altas [4-5], permiten comunicar, a un sistema supervisor, parámetros eléctricos tales como: el tiempo de funcionamiento, las entradas y salidas de los pasos, el valor del FP, las corrientes, las tensiones, los armónicos de tensiones y corrientes, y otros parámetros.

En general estos reguladores presentan la dificultad de que carecen de una opción para el monitoreo y diagnóstico del estado técnico de los pasos de capacitores, de modo que puedan diagnosticar, de forma temprana, la pérdida de la eficacia del proceso de compensación.

En estos casos el mantenimiento eléctrico se realiza a partir de inspecciones toda vez que se ha detectado, por algún medio, que no se está alcanzando el valor deseado del factor de potencia lo cual suele suceder cuando ya la factura eléctrica está por llegar.

En el sector industrial y terciario se ha producido, desde la década del 80, una creciente tendencia a instalar sistemas de supervisión y control con adquisición de datos de los parámetros de interés. Desde el punto de vista energético también se supervisan estos sistemas para controlar el comportamiento de los parámetros de eficiencia.

Esta tendencia está caracterizada por la integración de varios sistemas, tales como el control de procesos, la vigilancia y seguridad, el uso de la energía, las comunicaciones, la seguridad del funcionamiento de equipos costosos y claves en los procesos [6-7].

La aparición de tecnologías y paquetes de sistemas integradores compiten hoy día en el mercado como productos de alta calidad y prestaciones.

En [8] se presenta un potente sistema integrador basado en tecnología de software de última generación y constituido por una colección de módulos perfectamente integrados en una plataforma común para ofrecer al usuario una amplia variedad de servicios y funcionalidades, sin embargo, su alto costo de adquisición no lo hace asequible para la mayoría de las industrias o sectores de servicios en funcionamiento con otros sistemas o no de bajo nivel productivo o ventas.

Para las comunicaciones industriales es común utilizar diversos buses de campo abierto [9] tales como profibus, ethernet y profinet, que les permiten a diferentes fabricantes conectar sus dispositivos a una misma red a través de protocolos de comunicación que facilitan su configuración y extracción de datos [10].

El controlador descrito en [5] utiliza el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP desarrollado por Schneider Electric, y que facilita la interoperabilidad entre los aparatos que utilizan los códigos de funciones Modbus [11].

Las arquitecturas de supervisión y control involucran varios dispositivos que elevan o reducen el nivel de complejidad de la red de comunicación [11], en función de la extensión y variedad de subsistemas a supervisar. En cuanto al control y supervisión de los bancos automáticos se refiere, esta arquitectura es simple y el controlador cumple las funciones de regulador e interface hombre máquina al mismo tiempo.

La compañía Allen Bradley presentó en el año 2011 una solución sencilla para reducir las penalidades por bajo factor de potencia [4], adicionándoles funciones de desconexión de cargas y control de la demanda. La solución utiliza una arquitectura abierta de conexión para varios tipos de controladores lógicos (PLC's), interfases de comunicación (HMI's) y sistemas de adquisición de datos (SCADA), conectados en una red Ethernet local como medio de comunicación. Sin embargo, en su programación, no tiene previsto el diagnóstico de los pasos como medida preventiva.

En este trabajo se presenta una solución alternativa y factible de ser incorporada en bancos de capacitores automáticos, la cual permite realizar la monitorización y diagnóstico, en tiempo real, de todos los pasos, para evaluar la efectividad del proceso de compensación automática de la potencia reactiva, a fin de facilitar, al personal técnico, la información necesaria para la toma de acciones preventivas y/o correctivas que

conlleven a garantizar el funcionamiento adecuado de dichos bancos.

ANALISIS TEÓRICO

El factor de potencia

Una amplia literatura técnica ha sido escrita para describir el comportamiento del factor de potencia en las instalaciones eléctricas. Diversos autores han propuesto métodos de cálculo y modelación a partir de conceptos e interpretaciones novedosas [12-14] que marcan diferencia en los conocimientos teóricos y prácticos para su análisis.

La utilización de capacitores se ha generalizado a como solución práctica para paliar los efectos de crisis energética y contrarrestar las penalidades por bajo FP. Los avances de la tecnología de su fabricación han permitido construirlos cada vez más baratos, eficientes y duraderos.

Elementos de un sistema de monitoreo y supervisión de la energía reactiva

El monitoreo y supervisión del proceso de compensación de la potencia reactiva es la aplicación de las técnicas y recursos necesarios para que el proceso de corrección del FP pueda ser realizado y controlado remotamente, coordinando el uso de los distintos elementos en tiempo real. En la mayoría de los casos se requiere un nivel de respuesta con intervalos de tiempo específicos, a fin de evitar pérdida de control de los sistemas.

En [15] se presenta la siguiente definición acerca de los Sistemas en tiempo Real (STR) como: "Cualquier sistema en el que el tiempo en el que se produce la salida es significativo. Esto generalmente es porque la entrada corresponde a algún movimiento en el mundo físico, y la salida está relacionada con dicho movimiento. El intervalo entre el tiempo de entrada y el de salida debe ser lo suficientemente pequeño para una temporalidad aceptable", p. 2.

Los STR interactúan con la parte externa utilizando los elementos eléctricos tales como captadores de señales, datos y actuadores [16]. La Figura 1 esquematiza la interrelación en entre estos elementos.

Los tiempos de medición y respuesta son impuestos por la parte externa del STR; en este caso hay que tener en cuenta el tiempo de conmutación de los

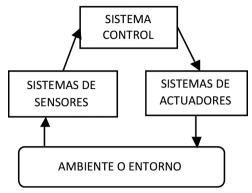


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema genérico de tiempo real.

contactores, duración de los transientes ocurridos por el efecto de la conexión, períodos de descarga de los capacitores y demoras en la adquisición de los datos desde los instrumentos de medición.

Comunicación con protocolo Modbus

Es muy común la comunicación entre dispositivos utilizando el protocolo de Modbus, por su simplicidad con que opera [11]. Este protocolo de mensajería se puede asociar a varios medios tales como las líneas serie bajo los estándares RS485 y RS232, siendo este último uno de los más utilizados. También se asocia a la Ethernet (TCP/IP).

Los Módems Serie son otra plataforma muy utilizada en la que los equipos se conectan a la red utilizando tecnología GSM (global system for mobile communications) o GPRS (general packet radio service) para transmitir los datos inalámbricamente a un servidor central.

Funciones básicas de un sistema de monitoreo

La adquisición y registro de datos y la representación del proceso constituyen la funciones básicas de un sistema de monitoreo.

Entre los elementos para la adquisición de datos se pueden mencionar las tarjetas de adquisición datos (TAD), las tarjetas y los buses de instrumentación: GPIB (HP-IB), bus paralelo basado en el estándar de la IEEE [17], los instrumentos de panel: reguladores autónomos, visualizadores, etc., los autómatas programables o PLC's, los ordenadores industriales, los buses de campo, los sistemas de control distribuido y las redes de comunicación.

La representación del proceso se define por la creación de sinópticos, indicación de alarmas y gráficas de tendencias, además de la creación de las bases de datos y de registros históricos.

Por su parte la supervisión se entiende como el conjunto de acciones desempeñadas con el propósito de asegurar el correcto funcionamiento del proceso incluso en situaciones anómalas. Comprende las etapas de: detección y diagnóstico de fallos y reconfiguración del sistema. La supervisión en la industria actual se realiza a través de los sistemas SCADA, (Supervisory Control And Data Adquisition). Comprende la aplicación o conjunto de aplicaciones software con acceso a planta, mediante comunicación digital con los instrumentos y actuadores, e interfase gráfica de alto nivel con el usuario.

Características básicas del proceso de regulación automática de los bancos

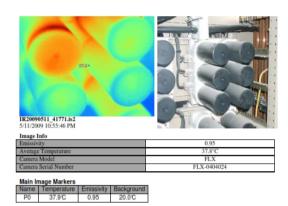
Los controladores varimétricos realizan la función de regulación con la ayuda de los sensores conectados en los puntos de entrada de la alimentación eléctrica, tales como transformadores de corrientes (TC), termostatos y las muestras de tensión. Los parámetros a configurar son los siguientes: El factor de potencia objetivo Cos φ, tipo de programación (normal, circular, óptimo) a emplear, número de escalones, parámetros límites o condiciones de servicio (temperatura, THDv y THDi) y banda de regulación de la batería (relación C/K).

La corrida del algoritmo del regulador intentará alcanzar el Cos φ objetivo dentro de un área de tolerancia en función del C/K, mediante la conexión o desconexión de los escalones correspondientes y disponibles. Los reguladores de la firma Schneider Electric [5] proporcionan varias opciones de programas de regulación: Programa de acumulación (lineal), Programa circular A, Programa circular B y el Programa óptimo.

El registro de datos y mensajes de alarmas en el regulador varimétrico se realiza dependiendo de las características técnicas específicas de cada regulador, no obstante la mayoría tiene implementado el tratamiento de alarmas para las desviaciones de: temperatura, alta y baja tensión, distorsiones armónicas totales de corriente y tensión y frecuencia.

Principales fallos detectados en los capacitores

De forma general las averías más comunes son: pasos con capacitores abiertos; desbalances en la corriente que puede entregar el paso; disminución de la potencia reactiva que puede suministrar, altas temperaturas, entre otras.



(Paso formado por dos capacitores trifásicos de 15 kVAr conectados en paralelo para formar un escalón de 30 kVAr. Como se puede apreciar existe deterioro en algunos de los vasos, manifestado por el incremento de la temperatura de algunos capacitores: color rojo).

Figura 2. Extracto de un reporte de un estudio termográfico.

Un reporte del estudio termográfico realizado en dos de los bancos analizados se presenta en la Figura 2, donde se aprecia la zona oscura indicando alta temperatura.

El tiempo de vida útil puede variar en función de las condiciones de trabajo reales de la instalación [18], en cuyo caso resulta que se han superado los límites especificados por el fabricante.

PROPUESTA DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL A EMPLEAR

Una vez conocidos los elementos básicos del proceso de regulación y mostrado las principales averías de los capacitores, se tienen todos los elementos técnicos necesarios para implementar un sistema de regulación más eficiente que incluya todas las acciones de control que hoy llevan a cabo los reguladores más modernos y se puede proponer la nueva estrategia de monitoreo.

Estructura del Hardware

Se basa en la utilización de medidores de energía de la serie PM500-820 y del controlador programable PLC Micro TSX 3722, ambos de Schneider Electric [19-20]. Estos medidores de energía poseen funciones de análisis de algunos parámetros de la red como es el grado de distorsión armónica de la tensión y la corriente, por lo que es común que al referirse a ellos, los especialistas del sector eléctrico, los mencionen como analizadores de redes. El PLC realizará las funciones de mando, regulación y control del proceso de compensación, auxiliándose de la lógica de programación del regulador. Completan la configuración del procesador los módulos: tarjeta de comunicación del autómata modelo TSX SC P114 y la terminal de diálogo del operador modelo Magelis XBT-N.

La terminal de diálogo [21] tiene pantalla alfanumérica y se usa para representar mensajes y variables. Poseen una interfase de usuario formada por: teclas de funciones, teclas de servicio y teclas numéricas.

Utilizando el protocolo de comunicación Modbus se realiza el proceso de adquisición de los datos medidos por el analizador de redes PM. La lectura de los parámetros eléctricos del sistema se almacena en localizaciones de memorias del autómata para su posterior utilización en la secuencia de programación correspondiente.

El procesador TSX, desde el punto de vista de comunicación, tiene doble función: cuando realiza la petición de los datos al analizador de redes PM se comportará como Máster a través de la tarjeta de comunicación PCMCIA, utilizando un bus con direccionamiento Uni-telway, sin embargo al interactuar con el supervisor se comportará como esclavo a través del conector terminal.

El esquema de conexión mostrado en la Figura 3 se utiliza para el establecimiento de la comunicación entre los dispositivos que intervienen en el sistema. El autómata Master se comunica con el dispositivo esclavo Varlogic a través de la tarjeta PCMCIA y con el supervisor a través del conector TER o AUX.

Se configura el procesador para la realización de las acciones de control, a través de una tabla animada que permite la visualización de todas las variables y localizaciones de memoria del autómata. Esto permite una interacción directa del programador con el dispositivo de control.

Las salidas del relé del regulador se tratan como entradas lógicas del autómata. Algunas salidas del procesador se llevarán a los bornes de alimentación de las respectivas bobinas de los contactores de mando de cada escalón de capacitores. De esta forma el autómata también interviene en el proceso de regulación del FP.

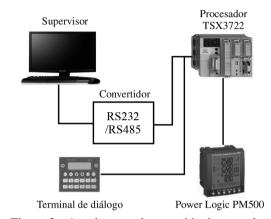


Figura 3. Arquitectura de conexión de un esclavo mediante una tarjeta PCMCIA

En condiciones normales de operación (escalones en buen estado y logro del FP deseado) las salidas antes mencionadas son trasparentes, se activan según las acciones de regulación del controlador. Cuando se detecta inestabilidad en el proceso de compensación (no se logra el FP objetivo y todos los pasos están conectados) el controlador lógico espera hasta encontrar el momento de menor demanda de potencia reactiva e inhabilita la acción de regulación y pasa al estado diagnóstico del banco de forma automática. Una vez terminado el test almacena los resultados y los envía a la terminal de diálogo. Los escalones que no cumplan con el límite de aporte de potencia reactiva fijado en el programa son desactivados del proceso de regulación y son dados como fuera de servicio. El procesador realiza la generación del reporte correspondiente.

El diagnóstico se puede realizar de forma remota desde una PC como parte de un sistema de supervisión existente, así como de forma local desde la terminal de diálogo.

Variables que intervienen en el control

Se utilizan como variables: tensión de línea, corriente por fase, factor de potencia por fase y total, distorsión armónica total de corriente (THDi), distorsión armónica total de tensión (THDv) y la frecuencia. La potencia reactiva capacitiva antes y después de la compensación se calcula a partir de los valores instantáneos de tensión y corriente, puesto que para estos parámetros el analizador de redes introduce menor error de precisión [20].

El Sistema de control. Algoritmo matemático

El sistema de control se puede definir como discreto, teniendo en cuenta que tanto las variables de entrada como las que se desean controlar son del tipo discretas.

El software de programación incluye el tratamiento de variables booleanas y numéricas, empleadas convenientemente en los diferentes módulos de comparación y ciclos de diagnóstico.

Se han utilizado las expresiones que se derivan del análisis del triángulo de potencias. Expresando la potencia entregada por el capacitor en función de la tensión y la corriente de la red se obtiene:

$$Q_{c} = \sqrt{3} * \left(\overline{V_{ll}} * \overline{I_{T}} * Sen\varphi - \overline{V_{lld}} * \overline{I_{Td}} * Sen\varphi_{d} \right) \ \ (1)$$

donde:

 $\overline{V_{ll}}$: Tensión promedio de línea sin compensación.

V_{lld}: Tensión promedio de línea después de conectado el escalón de capacitores.

 $\overline{I_T}$: Corriente total promedio consumida por la carga sin compensación.

 $\overline{I_{Td}}$: Corriente total promedio consumida por la carga después de conectado el escalón de capacitores.

Sen j: Seno del ángulo de desfasaje entre los vectores de tensión y corriente sin compensación.

Sen j_d : Seno del ángulo de desfasaje entre los vectores de tensión y corriente después de conectado el escalón de capacitores.

El cálculo de Q_{cns} se realiza por la expresión:

$$Q_{cns} = Q_{cn} * \left(\frac{U_s}{U_n}\right)^2 \tag{2}$$

donde:

Q_{cns}: Potencia reactiva de salida del capacitor a la tensión de servicio.

 Q_{cn} : Potencia reactiva nominal del capacitor según fabricante, antes de instalarlo.

 U_s : Tensión de servicio.

 U_n : Tensión nominal de diseño del capacitor.

Cuando se inicia el diagnóstico el PLC comprueba el estado de los contactores que gobiernan los pasos, en ese instante inhibe la acción del Varlogic y comienza una secuencia de desconexión de todos los pasos de forma escalonada, respetando el tiempo de conmutación entre pasos a un valor igual o mayor de diez segundos [5]. Con esto se garantiza disminuir los efectos indeseables producidos por los transientes de corrientes y tensión que ocurren tanto en la conexión como en la desconexión de los capacitores [22] y que se pueden determinar por las expresiones siguientes:

$$I_s \approx I_n * \sqrt{\frac{2S_{cc}}{Q}}$$
 (3)

$$\Delta U \approx \frac{Q}{S_{co}} * U \tag{4}$$

donde:

 I_n : Corriente nominal del capacitor (valor eficaz) en amperios.

 I_s : Valor de cresta de la intensidad de conexión de un solo capacitor.

 S_{cc} : Potencia de cortocircuito en el punto de conexión del capacitor.

Q: Potencia reactiva Expresada en MVAr.

U: Tensión antes de conexión del capacitor, V.

 ΔU : Aumento o variación de la tensión, V.

Terminada la desconexión del último escalón se produce un retardo de veinte segundos y comienza la secuencia de diagnóstico del primer escalón.

Concepción del diagnóstico

El aporte de cada escalón se determina calculando su efecto sobre la corriente de cada una de las fases, esto posibilita el análisis del desbalance que se produce al inyectar corriente reactiva capacitiva cuando existe un capacitor averiado dentro de la conexión en delta. La diferencia entre la potencia reactiva

antes y después de compensar da como resultado la potencia reactiva entregada por el paso en el momento del diagnóstico. Este método de medición indirecta, que tiene en cuenta la influencia del capacitor sobre los parámetros nominales de la red, calcula el aporte de potencia reactiva de cada escalón.

Utilizando expresiones estadísticas se analizan los resultados de cada prueba para determinar el valor medio de la muestra estudiada. Se determina el error absoluto o incertidumbre absoluta ΔQ [25], como la diferencia entre el valor verdadero Q_c patrón y el valor medio de la potencia reactiva en servicio Q_{cs} :

$$\Delta Q = \overline{Q}_{cpatr\'{o}n} - \overline{Q}_{cs} \tag{5}$$

Con esto se logra conocer los límites del intervalo donde con mayor probabilidad se encuentra el mejor valor de $Q_{\rm cs}$. A este se le denomina intervalo de confianza y se puede representar gráficamente como se muestra en la Figura 4.

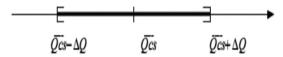


Figura 4. Intervalo de confianza para una medición.

No se tuvieron en cuenta aquellas mediciones que introducen mayores incertidumbres en el resultado esperado y se minimizan las perturbaciones que introducen las variaciones de las cargas en funcionamiento sobre los resultados de las mediciones realizadas. Finalmente se recalcula el valor de $Q_{\rm cs}$ promedio y se compara con respecto a la potencia reactiva capacitiva nominal promedio en servicio $Q_{\rm cns}$, calculada mediante la expresión 2, y se determinan las pérdidas de potencia expresada en por ciento de cada etapa de compensación, después de lo cual el PLC selecciona los pasos que no cumpla con el umbral establecido y los pone fuera de servicio.

Lenguaje de programación

Se escogió como programa el lenguaje literal estructurado (ST). Esto permite presentar un software con buen nivel de programación y mejor adaptado a las complejidades que exigen los diferentes módulos de diagnóstico y comparación, como por ejemplo la realización de diagnósticos iterativos.

Módulos de programa. Diagramas de flujo

Se han definido los siguientes módulos:

- Comunicación: define el procedimiento de la petición y el almacenamiento de datos solicitados al dispositivo esclavo.
- Operación normal: manejan las salidas digitales del autómata correspondiente a cada paso en función de las entradas que tenga activada (salidas del Varlogic).
- Diagnóstico: realiza la verificación del estado técnico de todos los escalones que conforman el banco.
- Protecciones: establecen las secuencias de programas donde se realizan las comparaciones de los parámetros eléctricos que influyen en la vida útil de los capacitores contra los valores nominales establecidos en las normas.
- Tratamiento de alarmas y reportes: En la Tabla 1 se muestran todas las alarmas que deben ser presentadas en la interfase de visualización para el operador, así como en el puesto del supervisor.

Tabla 1. Listado de alarmas establecidas y posibles causas.

Nº	Alarma	Posibles causas
1	Bajo factor de potencia.	Banco desconectado
2	Falta de kVArc	Escalones defectuosos
3	Capacidad de salida baja	Escalón con Q_{cs} menos de 75% de Q_{cns}
4	Temperatura Elevada	Fallo del Ventilador
5	Sobre tensión	Inestabilidades de la red
6	Sub tensión	Inestabilidades de la red
7	Distorsión de la tensión	Contaminación por armónicos
8	Desviación de la frecuencia	Inestabilidades de la red

Control y registros de eventos

El sistema provee el control y registro de los eventos para cada uno de los parámetros regulados en la sección de protecciones. Los límites se determinaron consultando las normativas aprobadas [22] que establecen las características de funcionamiento y ensayo de envejecimiento respectivamente de los capacitores de potencia autoregenerables.

Los estándares europeos y los de la IEEE [23-24] también caracterizan los eventos de variaciones de tensión desde diferentes enfoques. Se tienen

en cuenta los valores establecidos en [24] por considerar que tienen mejor aproximación a los umbrales especificados en [22]. También se controla el tiempo de operación de cada escalón. El resultado se refleja a nivel de supervisor mediante una tabla que relaciona el número del escalón, el tiempo en horas y la cantidad de operaciones.

Supervisión remota

Para la comunicación se emplea un software OPC Server. Se utiliza el Iconics V2.11 (Modbus Server software para OPC). El canal de comunicación se forma con un cable de dos pares trenzados apantallados serie CSW 40/08 más un dispositivo TSX PACC01, ambos fabricado por Schneider Electric. Se programaron algunas pantallas. A modo de ejemplo se muestra en la Figuras 5 la pantalla de los resultados del diagnóstico.

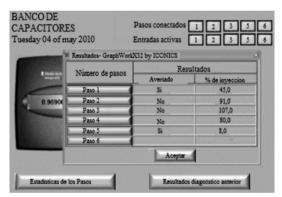


Figura 5. Pantalla que muestra los resultados del diagnóstico

ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Pasadas las pruebas de laboratorio se valida la solución en una entidad con características técnicas y de distribución eléctrica similares a las instalaciones objeto de estudio, a fin de poner a punto el programa en condiciones reales de funcionamiento antes de ser instalado el sistema en los hoteles. La entidad escogida fue el hospital clínico quirúrgico provincial "Lucía Iñiguez Landin" de Holguín, Cuba.

Validación del módulo de diagnóstico

Se instaló la maqueta de prueba en los dos bancos de capacitores conectado en cada sección de barra normal del tablero eléctrico general. Este banco está compuesto por 5 pasos de 20 kVAr cada uno, para una potencia reactiva capacitiva total de 100 kVAr, de la firma Schneider Electric y utiliza un regulador Varlogic N6.

El período de medición en cada caso fue de tres días. Se realizó un análisis del comportamiento de las cargas para determinar los horarios donde la carga reactiva se comporta más establemente, siendo este el de la madrugada. Se ajustó el instante y el tiempo de muestreo antes y después de la conexión del paso de capacitores para garantizar la menor influencia de las variaciones de las cargas, aún en los horarios de mayor estabilidad.

Se constató que la desconexión de los pasos, al iniciar el diagnóstico se realizó escalonadamente garantizándose la disminución de los transientes indeseables. Se determinó, como instante óptimo para calcular el valor de Q_{cns} , el instante en el cual se inicia la prueba, obteniéndose un valor de umbral para cada paso, ajustado a las condiciones reales de servicio, en el momento del diagnóstico.

Las gráficas siguientes muestran los resultados obtenidos en el diagnóstico realizado a los bancos conectados a la secciones de barras I y II del hospital, comparándolos con las mediciones realizadas con un instrumento patrón en las mismas condiciones de servicio, ver Figuras 6 y 7.

Se programaron cinco iteraciones de diagnósticos a realizarse en tres días en diferentes horarios. Las

Potencia kVAr Escalones Banco I Hospital Clínico Holguín

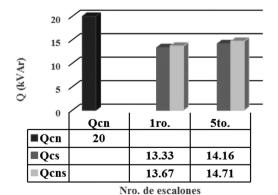


Figura 6. Resultado del diagnóstico Banco I.

Potencia kVAr Escalones Banco II Hospital Clínico Holguín.

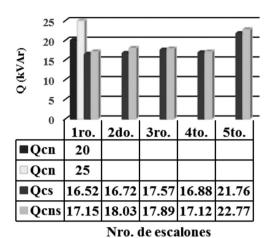


Figura 7. Resultado del diagnóstico Banco II.

barras de color gris oscuro representan los valores de potencia calculados, mientras que las de gris claro corresponden a las del instrumento patrón. El color negro representa la potencia nominal de los pasos del 1 al 4 y la barra de color más claro de la Figura 7 es la del paso 5.

Se obtuvieron los valores promedios de potencia reactiva próximos a los resultados esperados, durante la corrida de cinco diagnósticos durante tres días de validación. En las Tablas 2 y 3 se muestran los valores correspondientes a las mediciones graficadas.

Cálculo de errores y estimación de las desviaciones estadísticas

Se determinaron los errores relativos individuales para cada escalón, obteniéndose resultados entre 0,023 kVAr y 0,03 kVAr, así como errores absolutos entre 0,32 y 0,68 kVAr. El error absoluto total para el banco fue de 1,6 kVAr.

Al recalcular el valor de $Q_{\rm cs}$ con las muestras más confiables se obtuvo peores resultados y los errores se incrementaron. Se estimó la desviación estándar y considerar la distribución de $Q_{\rm cs}$ como normal [26-27]. Se obtuvo como resultado que se necesita trabajar con un tamaño de muestra no menor a 121, con los cual se obtuvieron valores promedios de potencia reactiva próximos a los resultados esperados, obtenidos de la corrida de cinco diagnósticos durante tres días de validación.

Tabla 2. Diagnóstico correspondiente a Banco I.

Resultados del diagnóstico con PLC								
	Qcn	1	5 ^{to}					
V	20	Q_{cs}	%	Q_{cs}	%			
448	17,42	19,33	111	11,49	66			
453	17,81	12,64	71	13,89	78			
456	18,05	8,12	45	14,07	78			
457	18,13	13,77	76	21,57	11,9			
458	18,21	13,11	72	14,02	77			
460	18,37	13,40	73	12,85	70			
460	18,37	12,49	68	13,77	75			
462	18,53	12,96	70	11,11	60			
462	18,53	13,52	73	14,63	79			
463	18,61	13,02	70	13,58	73			
463	18,61	13,39	72	13,95	75			
469	19,09	13,36	70	14,51	76			
469	19,09	14,12	74	14,51	76			
Pm	18,37	13,33		14,16				
Escalón	1	5						
Q_{cs}	13,33	14,16						
Q_{cns}	13,67	14,71						
%	97,49	96,21	96,85					
E	0,34	0,56	0,45					
Er	0,03	0,04	0,03					

No obstante, debido a la limitación de memoria RAM del PLC y a los efectos de validar la solución sin encarecerla más, consideramos oportuno cambiar la forma de encuestar a cada escalón para minimizar los errores y disminuir la influencia de las variaciones de las cargas en el momento del diagnóstico, razón por la cual se aumentó el número de mediciones hasta donde la capacidad de memoria física lo permitió. Se realizaron modificaciones a los diagramas de flujo según estos resultados, el cual se muestra en la Figura 8.

Se encuesta a un mismo escalón en cinco oportunidades respetando los intervalos de tiempo de seguridad

Tabla 3. I	Diagnóstico	correspondiente	a Banco II.
------------	-------------	-----------------	-------------

Resultados del diagnóstico con PLC									
	Q_{cn}			1 ^{er}			2 ^d	2 ^{do}	
Volts	20	25		Qcs		%	Qcs	%	
456	18,1	22	,6	15,7	87		16,1	89,0	
461	18,4	23	,1	16,6	1	90	17,0	92,0	
462	18,5	23	,1	16,3		88	12,4	67,0	
462	18,5	23	,2	16,7		90	17,4	94,0	
463	18,6	23	,3	16,7		90	16,9	91,0	
464	18,7	23	,4	16,3		87	17,6	94,0	
469	19,1	23	,9	16,8		88	17,2	90,0	
470	19,2	24	,0	19,0		89	17,4	91,0	
473	19,4	24	,3	15,5	T	80	18,4	95,0	
459	18,4	22	,9	16,5			16,7		
3	er			4 ^{to}		5 ^{to}			
Q_{cs}	%			Q_{cs}		%	Q_{cs}	%	
16,8	93,0)	1	18,8	1	20,0	21,3	118	
17,7	96,0)	1	16,6	(90,0	21,6	117	
16,9	91,0)	1	16,3	- 1	88,0	21,9	118	
17,0	92,0)	1	16,5	- 1	89,0	21,5	116	
17,7	95,0)	1	16,7	(90,0	21,6	116	
17,2	92,0)	1	16,8		90,0	22,1	118	
17,6	92,0)	1	16,8	- ;	88,0	22,0	115	
19,0	111,	0	1	16,7	87,0		22,1	115	
18,3	94,0)	1	16,7	1	86,0	21,9	113	
17,5			1	16,8			21,7		
Escalón	1	2		3		4	5		
Q_{cs}	16,6	17,	7	17,5		16,8	21,7		
Q_{csn}	17,1	18,	0	17,8	17,1		22,7		
%	97	93		98		99	96	96	
Е	0,53	1,3	31	0,32		0,24	1,01	0,68	
Er	0,03	0,0)7	7 0,02		0,01	0,04	0,04	

establecidos para los bancos de capacitores. Se almacenó en memoria la potencia reactiva en servicio y la potencia reactiva nominal en servicio para cada instante de muestreo. Luego de terminar con un escalón se repite el procedimiento para el resto.

La duración promedio de cada prueba con un escalón es de 3 min. Se realizaron 4 iteraciones de diagnóstico en horarios preestablecidos y finalizada la última se calculan los valores promedios de las magnitudes medidas, se comparan y se determina el promedio que tienen los respectivos pasos con respecto a su potencia nominal en servicio. Se dejaron fuera de servicio aquellos que tuvieron menos del 75% de su capacidad nominal.

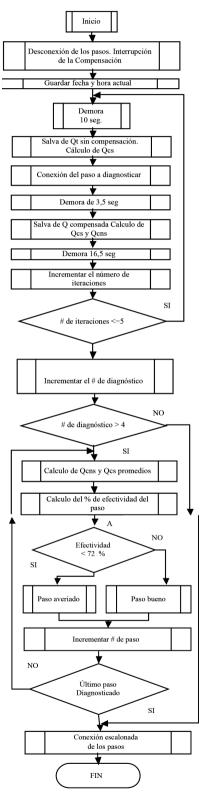


Figura 8. Diagrama de flujo mejorado del módulo de diagnóstico.

Caso de estudio banco de capacitores Zona B1

Una vez compiladas las modificaciones hechas a la sección de diagnóstico se implementó la solución en los bancos automáticos del hotel Playa Pesquero de Holguín. Se presenta el caso el banco de la zona B1. Este banco está compuesto por 5 pasos de 25, 50, 25, 25 y 25 kVAr respectivamente, para una potencia reactiva capacitiva total de 150 kVAr, de la firma Schneider Electric. Cuenta con un regulador Varlogic Nº 6. Se programaron 4 iteraciones de diagnósticos a realizarse en tres días en diferentes horarios. De esta manera se probó cada escalón para todos los estados de carga posibles del hotel.

Los resultados estuvieron dentro del margen esperado, ver Tabla 4. Disminuyeron las incertezas relativas individuales aunque se mantuvo igual el valor promedio para el banco completo.

En la Figura 9 se muestra la barra en color gris que representa los resultados obtenidos por el software de diagnóstico, mientras que la de color negro representa las mediciones realizadas en los bornes de salida de cada escalón empleando un instrumento patrón.

Resultado diagnóstico. Banco Zona B. Hotel Playa pesquero

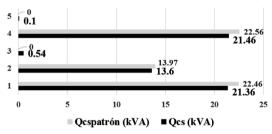


Figura 9. Resultado del diagnóstico Banco Zona B1.

Análisis técnico y económico

A continuación se detallan los componentes asociados a solución propuesta, basado en componentes de Schneider Electric y de un sistema de monitoreo prefabricado, de desempeño y características similares, ofrecido por la marca comercial Allen Bradley. En la Tabla 5 pueden compararse los costos asociados a cada solución. Los costos antes mencionados, están basados en ofertas recibidas de ambos fabricantes, con precios en dólares americanos a la fecha diciembre 2016.

Tabla 4. Diagnóstico por software, correspondiente a Zona B1.

	1er O 25 LVA								
	II.c. v	$\begin{array}{c c} & 1^{er} Q_{cn} = 25 \text{ kVAr} \\ \hline Us \text{ volts} & Q_{cns} \text{ kVAr} & Q_{cs} \text{ kVAr} \end{array}$							
	398		<i>Q_{cns}</i> kVAr 24,80			+	19,96		
	397		24,74		+	21,66			
1 ^{era}	307		24,75		+	21,24			
Iteración	397		24,74		+	21,70			
	397		24,73		+	21,50			
	397			$\frac{4,7}{24,7}$		+		_	
	398		24,76		$^{+}$	20,67 21,93			
2^{da}	307		24,72		$^{+}$	21,16			
Iteración	398			4,7		$^{+}$	22,27		
	398			4,7		t	22		
	401			25,1		\dagger	22		
	401			25,1		t	20		
3era	401			25,1		†	20		
Iteración	401	_		25,2		t	20		
	401			25,1		$^{+}$	20		
	403			25,4		t	20	<u> </u>	
	403			25,4		†	21		
4 ^{ta}	403			25,4		†	21		
Iteración	403			25,4		T	21	_	
	403			25,48		T	21,93		
Prom.	400			25,12		T	21,38		
	$c_n = 50$ k				٠.	n = 25 kVAr			
1									
Us volts	$Q_{cns} \ ext{kVAr}$	Q _{cs} kVA1	r	vol			2 _{cns} VAr		Q_{cs} kVAr
397,67	49,42	12,83	3	395,90		2	4,49	H	20,86
397,47	49,37	12,74	_	396			4,56	-	21,38
397,11	49,28	14,07		396			4,52	_	20,07
397,31	49,33	12,94		395			4,49	-	20,86
396,91	49,23	12,58		396,06			4,51		21,15
399,12	49,78	13,43	\rightarrow	399,92			4,99	-	21,35
399,40	49,85	11,13	$\overline{}$	400,80			5,10	-	20,66
399,76	49,94	11,81		401,36			5,17		21,81
400,16	50,04	17,17		401,28			5,16		21,70
400,08	50,02	17,37	7 .	401,28			25,14		20,63
401,28	50,32	14,29) .	402,23		2	5,28		21,45
401,60	50,40	13,21	[·	402	,07	2	25,26		21,67
401,48	50,37	12,54	1 7	401	,92		25,24		22,37
401,24	50,31	12,91	[4	401	,44	2	25,18		23,84
401,48	50,37	13,47		402,00			25,25		20,89
404,85	51,22	13,95		404,22			25,53		21,80
404,10	51,03	13,46		404,14			5,52		19,50
404,02	51,01	13,76		404,14					21,80
403,78	50,95	14,78		404,22			25,53		22,87
403,54	50,89	13,71						22,04	
401,26	50,32	13,60) .	401	,39	_2	5,17		21,4
Escalón	1	2	3	3	4		5		
Q _{cs}	21,3	13,6	0,	54	21,	4_	0,10		
Q_{cs}	22,4	13,9	0,	00	22,	5	0,00		95,9
~	0.5	0.=			0.5			$\overline{}$	0.04

Escalón	1	2	3	4	5	
Q_{cs}	21,3	13,6	0,54	21,4	0,10	
Q_{cs}	22,4	13,9	0,00	22,5	0,00	95,9
%	95	97	_	95	_	0,04
Е	0,05	0,03	_	0,05	_	0,85
Er	1,08	0,37	_	1,10	_	0,04

En este análisis se estimaron los costos para la implementación del sistema de monitoreo propuesto, suponiendo que el usuario no dispone de un sistema supervisor integrador; para el caso contrario el análisis es similar.

Costo de la inversión y tiempo de recuperación. Se consideraron los costos relacionados a los materiales que hay que adquirir para la implementación del sistema de monitoreo. La Tabla 5 muestras una comparación de los precios de dos sistemas de monitoreo y control.

Tabla 5. Precios de adquisición de dos sistemas de monitoreo.

Descripción del material por fabricante								
Schneider Electric	Precio \$ USD	Allen Bradley	Precio \$ USD					
Sistema de Monitoreo. Consta de: Medidor de energía, PM5100 CL05 Controlador programable PLC, Micro TSX 3722CA Tarjeta de comunicación PCMCIA RS485/422 UTW-MB-CC Convertidor TSXCUSB485 RS232/RS485 Dispositivo TSX PACC01	2.219,48	Controlador de Banco Capacitores 1413-CAP- ME-PE ALLEN BRADLEY Consta de: PowerMonitor 1000 unit, MicroLogix 1400 controller, HMI, and Ethernet cable.	3.718,7					

En relación al sistema de control de Allen Bradley [28], el mismo cumple con la mayoría de las funciones usuales de estos sistemas para bancos de capacitores. Consta de hardware Allen-Bradley para realizar la corrección del factor de potencia y está basado en el Controlador Micrologic 1400, un módulo PowerMonitor 1000, y una interface hombre máquina (HMI). Utiliza la información de los parámetros eléctricos y optimiza la potencia reactiva conmutando hasta 10 pasos de capacitores. Esta estrategia permite controlar el factor de potencia al mismo tiempo que reduce la probabilidad de un aumento de la tensión eléctrica. Algunas de sus funciones básicas son: auto configuración,

configuración manual, tiempo de descarga para cada paso de capacitores y selección del modo de operación.

Este sistema, aunque realiza la detección de bajo aporte de potencia reactiva, no cuenta con una rutina que permita diagnosticar la efectividad de los pasos de capacitores antes de que estos se deterioren completamente, aspecto en el cual nuestra solución aporta avances significativos.

Tomando como caso de estudio el centro de carga de la Zona B1 del Hotel Playa Pesquero, el cual contribuye con una facturación (FACT) de \$ 15.073,72 a los gastos mensuales del hotel, se calcula la variación del costo por factor de potencia, considerando la máxima compensación posible que en Cuba está regulada en un rango del 92 al 96%:

$$\Delta Costo = \left[\left(\frac{0.92}{\cos \varphi} - 1 \right) \right] * FACT$$

$$\Delta Costo = \left[\left(\frac{0.92}{0.96} - 1 \right) \right] * 15.073,72$$

$$\Delta Costo = \left[-0.0416 \right] * 15.073,72$$

$$\Delta Costo = -627,07$$$
(6)

El valor anterior representa una bonificación en la factura por operar el centro de carga con un factor de potencia de 0.96. Con estos ingresos por bonificación, y resolviendo la ecuación de la relación entre el costo total de la inversión y la ganancia mensual por ahorro, se calcula el Tiempo de Recuperación Simple (TRS), a saber:

$$TRS = \frac{Costo \ de \ Inversi\'on}{Ahorros \ mensuales}, (meses)$$

$$TRS = \frac{\$2.219,48}{\$627,07} \cong 3.54 meses$$
(7)

Al considerar el tiempo de recuperación para el sistema de control de Allen Bradley, vemos que:

$$TRS = \frac{\$3.718,75}{\$627,07} \cong 5.93 \text{ meses}$$

Con un precio de \$ 4.167,00 para el banco, el costo relativo de la solución propuesta (CRS) es:

$$CRS = \frac{Costo \ Solución \ propuesta}{Costo \ adquisición \ del \ banco} * 100\%$$

$$CRS = \frac{\$ \ 2.219,48}{\$ \ 4.167,00} * 100\%$$

$$CRS = 53,26\%$$
(8)

Se observa que el costo de instalación del sistema propuesto respecto al costo de adquisición del banco es de 53,26%, con un tiempo de amortización por concepto de bonificación de 3,54 meses aproximadamente.

CONCLUSIONES

El sistema desarrollado permite realizar las operaciones de monitoreo y diagnóstico de los parámetros eléctricos fundamentales para evaluar el grado de aporte de potencia reactiva de cada paso.

Se introduce un error de 0,03 kVAr en la determinación de las capacidades reales de cada paso de capacitores, valor no significativo ya que este error introduce un valor de kVAr menor que el margen de efectividad del 75% previsto para considerar que el paso este averiado o no. Un error total para el banco completo de 1,6 kVAr es satisfactorio.

El tiempo total de diagnóstico es relativamente corto. Considerando un banco de 5 pasos y de acuerdo al diagrama de flujo mejorado, el tiempo de diagnóstico por paso es de 3,5 segundos, mientras que el tiempo de espera entre un escalón y otro es de 16,5 segundos, por lo que el tiempo total es de 83,5 segundos. Todo el proceso de diagnóstico se habrá realizado en menos de dos minutos.

Al determinar el momento de menor demanda de potencia reactiva, el programa inicia las operaciones de diagnóstico sin la intervención del personal técnico, lo cual elimina los riesgos de contacto directo con las partes activas dentro del tablero eléctrico.

En las instalaciones eléctricas que posean en explotación un sistema de supervisión para la gestión de energía solo hay que adicionar el sistema propuesto para establecer el intercambio de información entre el PLC y el supervisor, completándose el sistema de supervisión y de gestión energética.

En comparación con la otra variante analizada, encontramos que la solución propuesta ofrece

mejoras técnicas en cuanto al diagnóstico y detección temprana de fallos en los pasos, a precios de ofertas más interesantes.

Del análisis económico realizado para el caso de estudio vemos que el costo de implementación del sistema respecto al costo de adquisición del banco es del 53,26%, valor razonable al considerar que el tiempo de amortización del banco por concepto de bonificación es de 3.54 meses aproximadamente.

La aplicación del sistema en varias entidades y los resultados obtenidos en cada uno de ellas indica que es posible su generalización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los docentes de la Universidad de Oriente, Cuba: Dr. Sergio Pablo de la Fé Dotres y el MSc. Israel Omar Mockey Coureaux, por sus orientaciones y sugerencias, así como al Ing. Wilberto Riveron Morales por su colaboración y dedicación.

REFERENCIAS

- [1] S. Electric. "Reactive Energy Management. Low Voltage components". Catálogo 2014. Editorial Altavia Connexion. Francia. Vol. 1, pp. 3-5. 2014. URL: www.schneiderelectric.com.
- [2] Legrand. "Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos". Ticino de Venezuela S.A., pp. 6-13. 2015. URL: www.bticino. com.ve/wp-content/uploads /2015/08/Catalogo_Bancodecapac_VEN.pdf
- [3] ABB. "ABB Power Quality Link, Installation and user guide", pp. 1-44. 2015. URL:www.newabb.com/highvoltagegeGe/capacitors/lv
- [4] A. Bradley. "Capacitor Bank Controller. Rockwell Automation". Publication 1413-PP001B-EN-P. 2011 Bulletin 1413, pp. 1-2. 2011. URL: rockwellautomation.com.
- [5] S. Electric. "Guide for the Design and Production of LV Power Factor Correction Cubicles". Catálogo 2015. pp. 32-36. URL:http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=PFCED111008EN&p_EnDocType=User%20guide&p_File_Id=791786230&p_File_Name=PFCED111008EN_Web.pdf

- [6] Honeywell. "Integrando sus sistemas para tener éxito", pp. 1-3. 2011. URL://buildingsolutions.honeywell.com/es-XL/newsevents/resources/Publications/ESLA_honeywell-hbs-sistemas%20de%20 integraci%C3%B3n-folleto_LR.pdf
- [7] A. Bradley. "The Connected Enterprise Rockwell Automation, Bringing people, processes and technology together", pp. 1-11. 2015. URL: //rockwellautomation.Com/ global/innovation/connected-enterPrise/ bringing-together-ebook.page
- [8] INGESYS. "Sistema de operación, control y supervisión de procesos en tiempo real", pp. 1-8. 2008. URL://ingeteam.com
- [9] V. Guerrero, R. Yuste y L. Martínez. "Comunicaciones Industriales". Editorial Marcombo. Primera Edición. Barcelona, España, pp. 111-323. 2016. ISBN: 978842 6715746.
- [10] A. Creus Solé. "Instrumentación Industrial". Editorial Marcombo. Octava Edición. Barcelona, España, pp. 72-76. 2016. ISBN: 9788426715746.
- [11] S. Electric. "Guía de Diseño en Instalaciones Eléctricas. Capítulo L". Editorial Tecfoto, S.L. Cuarta Edición. Barcelona, España, pp. 35-38, 342-367. 2010. ISBN: 84-609-8658-6.
- [12] D. Borges Vasconcelos, I. Pérez Abril y V. León Martínez. "Modelación de los efectos de la compensación de potencia reactiva en sistemas de suministro eléctrico". Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. Vol. 20 Nº 2, pp. 160-169. Agosto 2012. ISSN: 0718-305. URL: http://www.scielo.cl/scielo.
- [13] D. Borges Vasconcelos, I. Pérez Abril y V. león Martínez. "Compensación de potencia reactiva en sistemas desbalanceados utilizando algoritmos genéticos". Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. Vol. 20 Nº 3, pp. 284-292. Diciembre 2012. ISSN: 0718-3305. URL: http://www.scielo.cl/scielo
- [14] Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. España. Editorial Paraninfo S.A. Segunda Edición. 2015, pp. 350. ISBN 13: 9788428338103.
- [15] A. Burns y A. Weeling. "Sistemas de Tiempo Real y Lenguajes de Programación". Editorial Addison Wesley. Tercera Edición. New York. Estados Unidos. 2008. ISBN: 9788478290581.

- [16] G. Buttazo. "Hard Real Time Computing Systems". Editorial Springer. Tercera Edición. Pisa. Italia, pp. 8. 2011. ISBN: 9781461406761.
- [17] IEEE Standard. "IEEE 488.2-1992 Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands for use with IEEE Standard IEEE 488.1-1987 Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation". Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, USA. Revisada en el 2010. ISBN: 9780738106656.
- [18] WEB. "Manual de Seguridad, aplicación y mantenimiento de Capacitores de Corriente Alterna". Publicado por WEG Automatización S.A., pp. 5-10. Sao Paolo, Brasil. 2008. URL: www.weg.net/files/products/WEG-segurancae-aplicacao-de-capacitores-em-correntealternada-1024-manual-portugues-br.pdf.
- [19] S. Electric, "Guía de usuario para el PL7Micro/Junior. Funciones Específicas de Comunicación, tomo 1". Publicado por Schneider Electric. Versión 1. Barcelona, España. 2008. Referencia del documento: 35012341K01000.
- [20] S. Electric. "Guía de usuario Powerlogic PM500 Serie Medidores de Energía". Publicado por Schneider Electric. Francia. 2015. Referencia del documento: EAV15105 - EN04.
- [21] S. Electric. "Interface Hombre Máquina Magelis XBTN, XBTR y XBTRT para pequeños tableros". Schneider Electric. Francia. 2013. Catálogo Nº DIA5ED21306 08EN.
- [22] IEC Standard. "IEC 60831-1 Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V Part 1: General Performance, testing and rating Safety requirements Guide for installation and operation". International Standard. Edición 2.1. Corregida en 2014.
- [23] AENOR. "UNE EN 50160-2011. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución". AEN/CTN 217 Sistemas de suministro de energía eléctrica. 2011.
- [24] IEEE Standard. "IEEE 1159-2014. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". Institute of Electrical and

- Electronics Engineers. New York, USA. ISBN: 9780738159393.
- [25] E. Rodríguez, S. Gil. (2000). "Teoría de errores e incertezas de medición. Física Recreativa", pp. 1-8. Buenos Aires, Argentina. 2000. URL: http://www.fisicarecreativa.com/guias/capitulo1.pdf
- [26] H. Gutiérrez Pulido, R. de la Vara Salazar. "Análisis y Diseño de Experimentos". McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. Segunda Edición. México, D.F. 2008. ISBN-13: 978-970-10-6526-6.
- [27] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio. "Metodología de la Investigación". McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México D.F. 2010. ISBN: 978-607-15-0291-9.
- [28] A. Bradley. "User manual of Capacitor Bank Controller. Rockwell Automation". Publication 1413-CAP-ME-PE 2010
- [29] Bulletin 1413. URL: www.literature.rockwellauto.com/idc/groups/literature/docu-ments/ um/1413-um001_-en-p.pdf.A. Bradley. "User manual of Capacitor Bank Controller.