



APLICACIONES INDUSTRIALES

Gestión de la calidad de la energía eléctrica

Management of quality electrical energy

Mónica Rosario-Berenguer Ungaro¹
Rebeca Esther-Conde García¹
Douglas-Deás Yero¹

Norma Rafaela-Hernández Rodríguez²
Ramón-Arias Gilart¹

¹Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado. Santiago de Cuba. Cuba.

²Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Cuba.

Email: monicab@uo.edu.cu

[Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.](#)



Recibido: septiembre 2016

Aprobado: febrero 2017

RESUMEN/ABSTRACT

El trabajo tuvo como objetivo presentar la mejora del sistema de monitoreo y control de la Tecnología de Gestión Total de la Eficiencia Energética, desde la perspectiva del ciclo del conocimiento, con el fin de favorecer la sostenibilidad de los resultados. Se demostró la efectividad de los cambios propuestos a través del monitoreo y control de los indicadores de calidad de la energía eléctrica del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado en el período 2006 al 2016 dividido en dos etapas. De los indicadores estudiados, el de tensión se normalizó y el factor de potencia mejoró a 0.96 lo que permitió recibir una bonificación, que representó la disminución de un 4% en el importe de la factura eléctrica anual en la entidad. Esto a su vez contribuyó a la disminución de las emisiones de CO₂ sin disminuir el nivel de actividad.

Palabras clave: Calidad de la energía eléctrica, eficiencia energética, gestión energética, distorsión armónica, factor de potencia.

This work aimed to improve the system of monitoring and control of the total Management Technology of Efficiency Energy from the perspective of the knowledge cycle in order to promote the sustainability of the results. The effectiveness of proposed changes through monitoring and control of the quality indicators of electricity the National Center for Applied Electromagnetism in the period 2006 to 2016 divided into two stages was demonstrated. The indicators studied: voltage, voltage harmonic distortion and power factor showed significant progress regarding the standard and the initial stage. Evidenced by eliminating low voltage, with the decrease of 4% in the amount of the annual electricity bill, with reduced CO₂ emissions, without reducing the level of activity.

Keywords: Quality of electrical energy, energy efficiency, energy management, harmonic distortion, power factor.

INTRODUCCIÓN

La electricidad representa el principal insumo utilizado en las organizaciones, y sus características no solo dependen de los de los fabricantes de equipos, sino también del cliente. Por estas razones no se encuentra un concepto único de calidad de la energía eléctrica. La IEC 61000-4-30 la define como: “características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia” [1] y para la IEEE 1159-1995 es “una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica” [2].

Caracterizar la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, se hace a partir de la continuidad del suministro, relativa al número y duración de las interrupciones y de las características de la onda de tensión y de corriente [3]. Una mala calidad de la energía eléctrica trae consigo el incremento en las pérdidas de energía, daños a la producción, a la economía y la competitividad empresarial. En las últimas décadas con la introducción de cargas no lineales como las computadoras, los variadores de frecuencia entre otras, los efectos negativos en la calidad de la energía se han manifestado con mayor frecuencia [4].

Monitorear y mejorar el comportamiento de los indicadores de calidad de la energía eléctrica contribuye al uso eficiente de este recurso, por lo que debe constituir un objetivo de trabajo para las organizaciones. El suministrador, atribuye los problemas de mala calidad de la energía eléctrica a la instalación del usuario y viceversa [5-6]. La Tecnología de Gestión Total de la Eficiencia Energética (TGTEE) [7-8] constituye una herramienta para lograr esto. Entre los módulos que la conforman contiene un sistema para el monitoreo y control, el mismo consta de tres etapas, información, control y mejoramiento.

En la etapa de información solamente se recolectan datos, los mismos pueden ser cuantitativos o cualitativos pero desprovistos de significado.

En la etapa de control es en la que los datos recolectados cobran significado, al comparar los mismos con los estándares, por lo que en esta etapa es que los datos se convierten en información. En la etapa de mejoramiento es donde se establecen nuevos estándares, nuevos procedimientos, y de este modo se retroalimenta la etapa de control.

Este sistema asume que la comparación de los datos con los estándares siempre es regular y no ve como mejora la modificación de variables de control.

El objetivo de este trabajo es proponer a la comunidad empresarial la mejora del mismo, desde la perspectiva del ciclo del conocimiento con el fin de favorecer la sostenibilidad de los resultados y considerar que este es el que le proporciona sistematicidad a la tecnología.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se propone mejorar los indicadores de calidad de la energía eléctrica a través de la implementación de la Tecnología de Gestión Total de la Eficiencia Energética, considerando los cambios propuestos en el sistema de monitoreo y control, el sistema propuesto se representa en la figura 1.

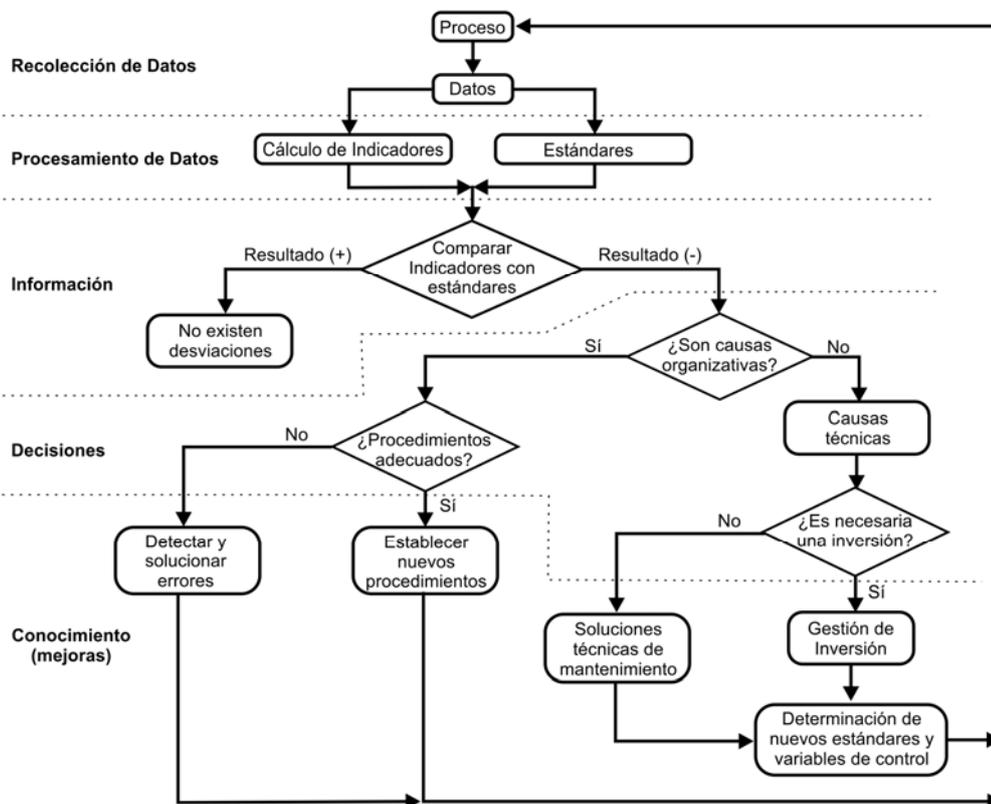


Fig. 1. Sistema de monitoreo y control.

La nueva propuesta del Sistema de Monitoreo y Control Energético propone reemplazar las concepciones existentes hasta el momento

sobre cómo llevar a cabo un sistema más comprensible de monitoreo y control. El nuevo sistema ofrece mayor flexibilidad, y fue concebido para ser aplicado a disímiles procesos, no solo de interés eléctrico, estos son algunos de los aspectos donde radica la mejoría de la propuesta, ante el esquema existente desarrollado por el Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos.

En la tabla 1, se presentan las etapas para implementar el sistema de monitoreo y control, así como los objetivos y salidas verificables, debe señalarse que debe culminar una etapa para comenzar la otra. El sistema se puede aplicar con independencia de la implementación o no de la TGTEE.

Para el caso en estudio los estándares utilizados son los referidos en las normas cubanas, para las tensiones y la distorsión armónica total. El factor de potencia, se contrasta con lo establecido en la Resolución No.311.2001 del Ministerio de Finanzas y Precios, relacionado con la bonificación y/o penalización por el comportamiento del mismo.

Tabla 1. Objetivo y materialización de cada etapa del sistema de monitoreo y control.		
Etapas	Objetivo	Salidas verificables
Recolección de datos	Datos obtenidos del proceso.	Registros de mediciones
Procesamiento de datos	Calcular los indicadores. En esta etapa se le da sentido a los datos recolectados,	Hoja de cálculo de los Indicadores.
Información	Comparación de indicadores con estándares. En esta etapa se le da sentido a los datos recolectados.	Informe de los resultados de la comparación.
Decisiones	Determinar causas de desviaciones.	Registro de causa de desviación detectada.
Conocimiento (Mejoras)	Materialización de soluciones, y proponer mejoras del proceso.	Solución de problemas existentes, y establecimiento de nuevos estándares, y variables de Control.

Niveles de tensión.

Para evaluar las tensiones se toma como referencia los valores estandarizados de la norma cubana, NC 365:2009.

Distorsión Armónica Total (THD)

La Distorsión Armónica Total (THD) (ecuación 1), define el nivel de armónicos contenidos en señales alternas y se determina por la ecuación (1).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1)$$

Donde:
 y_h es el valor eficaz (de corriente o de tensión) de armónico a partir del segundo armónico (armónicos superiores) y y_1 el armónico fundamental.

La Distorsión Armónica Total de tensión (THD_u) y la de corriente (THD_i) permiten conocer si existe polución armónica y si la instalación se encuentra en riesgo, contribuyendo de esta forma a la toma de decisiones.

El THD_u caracteriza la distorsión de tensión de la onda:

- para $THD_u < 5\%$ Situación normal, no existe riesgo de mal funcionamiento
- 5 a 8 % Polución armónica significativa, son posibles algunas malas operaciones. Permitido
- 8 % Gran polución armónica, son probables malas operaciones. Se requiere un análisis profundo y de instalación de dispositivos de atenuación. No permitido

El THD_i caracteriza la distorsión de la onda de corriente.

- THD_i por debajo del 10%, situación normal no hay riesgo de mal funcionamiento.
- 10 % al 50% polución armónica significativa con riesgo de elevación de la temperatura.
- Mayor de 50% gran polución armónica, son probables el mal funcionamiento, Se requiere un análisis profundo y de instalación de dispositivos de atenuación. No permitido

Para evaluar la funcionalidad del sistema propuesto, se aplicó el mismo en el Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), que tiene implementada la TGTEE desde el 2006.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se desarrollaron dos etapas, que se caracterizaron por los objetivos a alcanzar, siguiendo los pasos establecidos en la TGTEE, la primera etapa (2006-2011) tuvo como objetivo, realizar el diagnóstico y sensibilización, se evaluó el impacto del cambio de luminarias y equipos altos consumidores. En la segunda etapa (2012-2016), se evaluó el impacto de la instalación del banco de transformadores de uso exclusivo. Es importante señalar que en las dos etapas se realizaron acciones de capacitación, se desarrollaron dos tesis de diploma, una de maestría y se impartieron varios seminarios a los trabajadores.

Para estudiar el comportamiento del nivel de tensión, el THD_u y THD_i y el factor de potencia, se compararon los resultados del 2007 y el 2014, teniendo como requisito que se midió en el panel general de distribución y las mediciones se realizaron con un analizador de redes trifásico. Se realizó el monitoreo y control las etapas establecidas en el sistema de monitoreo y control, de la figura 1.

Recolección de datos:

En ambos años se tomaron los datos de un día característico, se midieron las variables tensión de línea, Distorsión Armónica Total de Tensión y Corriente y el Factor de Potencia.

Procesamiento de datos

Con los datos tomados por el analizador se elaboró una base de datos, y se utilizan los estadígrafos promedio, valores máximos y mínimos, desviación estándar para describir el comportamiento de los datos.

Los estándares de comparación utilizados fueron:

- Para la tensión, la norma cubana NC 365:2009, ella establece que el porcentaje aceptado de variación de tensión, está en función del nivel de tensión, de forma particular que para baja tensión $\pm 10\%$, para el nivel de tensión estudiado el rango encuentra entre $207 < U_L < 253$ V.
- Distorsión armónica total de tensión y corriente, se utiliza la norma cubana NC 800-1:2011
- Para el factor de potencia se utilizó la Resolución No.311.2001 del Ministerio de Finanzas y Precios, la misma establece los valores de factor de potencia en los cuales la organización será penalizada, bonificada o la factura estará sin variación.

Información.

Tensión

En el 2007 (tabla 2), se observa inestabilidad de la tensión, confirmado por la desviación estándar, manifestándose momentos de baja tensión, creando quejas de los trabajadores por mal funcionamiento de equipos de laboratorios. En el 2014 no se manifiesta baja tensión y no se reportan quejas de los trabajadores por este concepto.

Tensión de Línea U_{A-B} (V)		2007	2014
	Promedio	211,5	235,54
	Valor máximo	222,8	240
	Valor mínimo	204,8	230,30
	Desviación estándar	4,3	2,01

Distorsión Armónica Total de tensión (THD_u) y corriente (THD_i)

En el 2007 (tabla 3), el THD_u promedio estuvo por debajo del 5%, sin embargo se encontraron valores máximos ligeramente superior en 0.2%, existiendo polución armónica, permitida según la norma cubana NC 800-1:2011. En el 2015 este indicador se comportó por debajo del 5%, por lo que la instalación no se encontraba bajo riesgo de mal funcionamiento.

THD _u por Fase en %						
	2007			2014		
	VA-N	VB-N	VC-N	VA-N	VB-N	VC-N
Promedio	4,5	4,3	2,2	2,5	2,0	2,90
Máximo	5,2	5,4	2,7	2,8	2,4	3,5
Mínimo	3,3	3,0	1,6	2,0	1,0	2,2
Desviación Estándar	0,49	0,61	0,25	0,23	0,4	0,39

En el 2007 (tabla 4), el THDi se comportó por debajo del 10%, por lo que la instalación no se encontraba bajo riesgo de mal funcionamiento. En el 2014, el valor promedio de la I_C fue de 46 % lo que indica la existencia de polución armónica significativa y posible riesgo de elevación de la temperatura. El valor máximo estuvo por encima de lo permitido en la norma (50 %), por lo que existe probabilidad de mal funcionamiento de la instalación, por lo que se considera esta corriente como el caso crítico.

THDi en %						
	2007			2014		
	I_A	I_B	I_C	I_A	I_B	I_C
Promedio	3,8	4,5	0,8	11	7,1	46
Máximo	6,8	7,4	6,2	13	9	72
Mínimo	2,5	1,9	0,0	8	3	37
Desviación Estándar	0,72	1,07	1,40	1,61	1,61	8,18

Factor de Potencia

El factor de potencia en el 2007 (tabla 5), oscilaba entre 0,54 y 0,92, tiene como valor promedio 0,65, lo que provocaba la penalización, según resolución la Resolución No.311.2001 del Ministerio de Finanzas y Precios. Sin embargo en el 2014 el comportamiento de este indicador se estabilizó a valores en el que la resolución bonifica a la organización.

		2007	2014
		Promedio	0,65
Valor máximo		0,92	0,98
Valor mínimo		0,54	0,96
Desviación estándar		0,09	0,01

Decisiones

En el 2007 de los cuatro parámetros estudiados se encontraban fuera de normal: el nivel de tensión y el factor de potencia. Trayendo como consecuencia mal funcionamiento de los equipos de laboratorio y problemas de iluminación. Se caracterizó la fuente de suministro eléctrico y se realizaron cambios tecnológicos.

En el 2014 de los indicadores estudiados solo el TDHi indica que existe polución armónica significativa con riesgo de elevación de la temperatura y aunque está permitido, se indica repetir el estudio no solo en el panel general de distribución, sino en cada circuito que conforma el centro para localizar el origen de este comportamiento. Realizar evaluación económica y medio ambiental.

Conocimiento

2007

Nivel de tensión, al caracterizar la fuente de suministro eléctrico, se demostró que la misma se encontraba ubicada a una distancia de 200 m siendo el consumidor más alejado. Se calculó y se seleccionó la ubicación de una nueva fuente de suministro, se gestionó la inversión y se instaló la misma en octubre del 2012.

Factor de potencia, presentó valores bajos, por lo que se realizaron cambios tecnológicos que permitieron disminuir en un 40% la carga instalada de aires acondicionados y en un 64% la de las luminarias.

2014

El estudio individual de cada circuito no se ha materializado por movimientos internos, la creación de nuevos laboratorios y la instalación de nuevos equipos, que son bajos consumidores, pero representan cargas no lineales.

Evaluación económica.

A partir de los cambios tecnológicos, las acciones realizadas y los registros de consumo se han podido evaluar las bonificaciones por el

comportamiento del factor de potencia obtenidas desde el 2013. Estas representan 4% del importe anual, lo que significa un ahorro de 3256,48 CUP.

Evaluación Medio Ambiental.

Para esta evaluación se utiliza como indicador la huella de carbono definida por la cantidad de gases efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios [9,10]. En la figura 2, se muestra la huella de carbón del CNEA por uso de la electricidad.

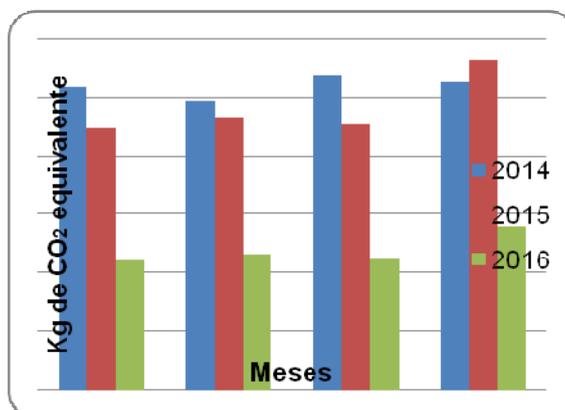


Fig. 2. Huella de carbono del CNEA por la electricidad.

El estudio de la huella de carbono se realizó en el primer cuatrimestre de los años 2014, 2015, 2016, la misma mantiene una tendencia a disminuir. El aumento en abril del 2015 está asociado a la ejecución de la Conferencia de Electromagnetismo Aplicado, que aumento el nivel de actividad en ese mes. La disminución está asociada a los cambios tecnológicos y la sub-contratación de partes que conforma la producción de los acondicionadores magnéticos.

CONCLUSIONES

Se propusieron cambios al sistema de monitoreo y control, por considerar que este es el que le proporciona sistematicidad a la Tecnología de Gestión Total de la Eficiencia Energética. La efectividad de los cambios se verificaron a través del estudio de los indicadores de calidad de la energía eléctrica: nivel de tensión, distorsión armónica total de tensión y corriente, y el factor de potencia como indicador de eficiencia energética, en el Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, en el período 2006-2016 dividido en dos etapas. Demostrando mejoras en la gestión de este portador energético.

Acercando la fuente de suministro se eliminó la baja tensión, el nivel de tensión se elevó de 211,5 a 235,54V como promedio. La distorsión armónica total de tensión no superó los valores normados en ninguna de las etapas, en la segunda etapa disminuyó en un 2,4%. La distorsión armónica total de corriente se deterioró en la segunda etapa, de forma crítica en la I_c , reportándose valores que indican contaminación armónica.

El factor de potencia mejoró de 0,65 a 0,96, esto representó una disminución del 4 % del importe de la factura eléctrica anual. Como efecto ambiental se reportó una disminución de las emisiones del CO_2 en el primer cuatrimestre de los últimos tres años.

REFERENCIAS

- [1]. IEC. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*. IEC61000-4-30:2015. [Consultado el: 19 de mayo del 2016] Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/21844>
- [2]. Díaz Rodríguez, J. L., Pabón Fernández, L. D., y Contreras Peña, J. L. Low-cost platform for the evaluation of single phase electromagnetic phenomena of power quality according to the IEEE 1159 standard. *Dyna*, 2015, vol 82 no.194, p. 119-129. [Consultado el: 5 de abril del 2017] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532015000600016&script=sci_arttext&tlng=pt.
- [3]. Pulgar, J. "Costos de la calidad en las empresas del sector eléctrico." *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, 2011, Vol. 1, N° 1, p. 70-78. [Consultado el: 12 de septiembre del 2016]. Disponible en: <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve/index.php/redip/article/viewArticle/97>. ISSN-e: 2244-7393
- [4]. Suárez, J.A. Mauro, J. Anaut, D. Mauro, R. Strack, J. L. "Análisis de la calidad de la energía en un centro de cómputos." *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 2013, Vol. 21 N° 1, p. 30-40. [Consultado el: 8 de septiembre del 2016]. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052013000100004&script=sci_arttext versión On-line ISSN 0718-3305
- [5]. Muñozuri, J. Onieva, L. Gutiérrez, E. Y Cortés, P. "Un enfoque cuantitativo para valorar el servicio eléctrico por parte de sus usuarios." *Economía industrial*, 2009, no 374, p. 83-93. [Consultado el: 12 de septiembre del 2016]. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/publicaciones/publicacionesperiodicas/economiaindustrial/revistaeconomiaindustrial/374/83.pdf> ISSN: 0422-2784
- [6]. Gil Montoya, F. Manzano Agugliaro, F. Gómez López, J y Sánchez Alguacil P. "Técnicas de investigación en calidad eléctrica: ventajas e inconvenientes", *DYNA*, 2012, vol.79 no.173. [Consultado el 8 de septiembre del 2016]. Disponible en:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0012-73532012000300008 ISSN 0012-7353

[7].Lapido Rodríguez, M.; Gómez Sarduy, J. R. Participación de la Universidad en la mejora de la eficiencia energética del sector productivo cubano. *Universidad y Sociedad*, 2014, vol. 6, no 2. Consultado el: 14 de abril del 2016 Disponible en:<http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/500>.ISSN (electrónico): 2218-3620.ISSN (impreso): 2415-2897

[8].Fernández Velázquez, L.; Carbonell Morales, T.; Aballe Infante, L.. Aplicación de Gestión Total Eficiente de Energía en el Centro Internacional de Salud" La Pradera". *Ingeniería Energética*, 2014, vol. 35, no 2, p. 112-121 [Consultado: 20 de marzo del 2016].

Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012014000200004&script=sci_arttext&tlng=pt

[9]. Espíndola, C.; Valderrama, J. O. Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Información tecnológica*, 2012, vol. 23, no 1, p. 163-176. Versión On-line ISSN 0718-0764.[Consultado: 11 de marzo del 2016].

Disponible en:http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000100017&script=sci_arttext

[10]. Wiedmann, T. A review of recent multi-region input–output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics*, 2009, vol. 69, no 2, p. 211-222. ISSN 0921-8009 Consultado: 11 de marzo del 2016 Disponible en:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800909003577>