

Efectos del uso masivo de bombillos ahorradores de energía sobre los transformadores de distribución

José Gregorio Díaz P., Juan Arcila, Charles Steblina

Universidad José Antonio Páez, Valencia, Venezuela

Email: jpdiazp@cantv.net, juacila@hotmail.com, ingcharles@cantv.net

Resumen

El impulso dado a la iluminación basada en lámparas fluorescentes compactas ha hecho que gran parte del alumbrado residencial, comercial y de oficinas se haya convertido en un importante generador de armónicos de corriente y voltaje dentro de las redes de distribución. Esto ocasiona algunos efectos indeseables en los elementos del sistema eléctrico, que afectan principalmente a los transformadores, cuya vida útil puede verse menoscabada. En el presente trabajo se examinan los conceptos fundamentales asociados a este problema y se recogen mediciones de forma de onda y contenido armónico realizadas con los llamados “bombillos ahorradores de energía”, que se han popularizado notablemente en el medio venezolano. A partir de estas mediciones, se formulan recomendaciones que buscan minimizar los efectos negativos de estas cargas sobre los transformadores.

Palabras clave: bombillos ahorradores de energía, transformador de distribución, armónicos, K-factor, factor K.

Effects of energy saving light bulbs on distribution transformers

Abstract

Compact fluorescent lamps (CFL) use has recently surged in residential and commercial electrical installations, basically due to its higher energy efficiency. However, being non-linear loads, CFL have become an important source of harmonics for distribution networks. Some negative effects are associated to this: transformers overheat and their life span diminishes. In this paper, the authors include some basic concepts and measurements of current wave forms and harmonic contents of some popular CFL. Based upon their tests they propose some recommendations in order to minimize CFL negative effects on transformers

Keywords: energy saving light bulbs, CFL, distribution transformer, harmonics, K-factor, factor K.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que las cargas no lineales han estado presentes en los sistemas de potencia desde sus inicios, sólo ha sido a partir de las últimas décadas cuando se ha incrementado notablemente la investigación acerca de los efectos negativos que las mismas pueden tener sobre los diferentes elementos que integran un sistema de potencia. Ello ha sido una consecuencia natural de la proliferación de equipos electrónicos que se comportan como cargas de este tipo (variadores de velocidad, fuentes de conmutación para la alimentación de computadoras y equipos de oficina, modernas luminarias más eficientes, etc.), los cuales se han instalado tanto en sistemas industriales como en comerciales, residenciales y de servicios.

Estas cargas no lineales se caracterizan por distorsionar la corriente circulante, en la cual introducen componentes armónicos de frecuencias múltiplos enteros de la fundamental. Al pasar a través de los transformadores de distribución, estas corrientes distorsionadas producen efectos como: calentamiento anormal, ruido y vibración excesivos y, en fin, una disminución de la vida útil del equipo [1, 2]. Esto ha conducido a que los organismos internacionales de normalización hayan establecido ciertos criterios prácticos para lidiar con estos fenómenos, de manera que los transformadores sean capaces de operar satisfactoriamente bajo tales condiciones de carga [3 - 5].

En varios países (incluyendo a Venezuela), los bombillos ahorradores de energía han pasado a ser una

fuente considerable de armónicos dentro de las redes de distribución, dado el impulso que su utilización generalizada ha recibido por parte de fabricantes, comerciantes e incluso organismos gubernamentales. Sin embargo, en nuestro país no se ha prestado mucha atención a los efectos perjudiciales que esta masificación puede traer consigo.

2. BOMBILLOS AHORRADORES DE ENERGÍA

Los llamados “bombillos ahorradores de energía”, también conocidos como lámparas o tubos fluorescentes compactos o CFL, por sus siglas en inglés (compact fluorescent lamps) constituyen un tipo especial de lámpara fluorescente que se caracteriza por contener en una sola unidad todos los elementos necesarios para su funcionamiento. Muchas veces, su diseño permite su instalación inmediata en los mismos portalámparas utilizados con los bombillos incandescentes, lo que facilita la sustitución de estos últimos.

La principal ventaja de estas lámparas con respecto a las tradicionales reside en el hecho de que, para producir la misma cantidad de luz visible, utilizan menos energía eléctrica. Adicionalmente, su vida útil es considerablemente mayor. Sin embargo, también presentan algunas desventajas: el espectro de la luz emitida no es necesariamente el mismo de la luz natural, no se adaptan muy bien al uso en exteriores o en ambientes húmedos, su duración se ve fuertemente afectada por las variaciones en la tensión de alimentación y su costo es muy superior al de los bombillos incandescentes. Además, contienen mercurio, material que puede generar riesgos ambientales a la hora de su desecho. Aparte de estas desventajas que cualquier usuario puede constatar, estas lámparas tienen un comportamiento eléctrico no lineal, que se manifiesta bajo la forma de una corriente distorsionada con respecto a la sinusoidal.

Al hacerse masiva su utilización, la presencia de los armónicos generados por estas lámparas en las corrientes circulantes a través de las redes de distribuciones incrementa, ocasionando el recalentamiento de transformadores y conductores, lo cual se refleja en la disminución de su vida útil y mayor riesgo de incendios. Además, las caídas de voltaje ocasionadas por estas corrientes distorsionadas también contienen armónicos, los cuales producen deformaciones del voltaje de la red. Esto puede conducir al mal funcionamiento de equipos sensibles [6].

3. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Las pérdidas totales en un transformador (P_T) se calculan como la suma de las pérdidas en vacío (P_C) y aquellas asociadas a la carga (P_{LL}) [7]:

$$P_T = P_C + P_{LL} \quad (1)$$

Las pérdidas P_C ocurren en el núcleo y son debidas al voltaje aplicado al transformador. Aunque la corriente de magnetización incluye armónicos, éstos son muy pequeños en comparación con la corriente de carga y, por lo tanto, la norma ANSI/IEEE C57.110-1998 considera despreciables sus efectos [3].

Las pérdidas asociadas a la carga (P_{LL}) están formadas por: pérdidas por efecto Joule (P_J) en los devanados, pérdidas por corrientes de *eddy* en los conductores (P_{EC}) que están asociadas a la corriente de carga, y pérdidas adicionales (P_{SL}), que ocurren en la cuba del transformador, abrazaderas, otras partes metálicas, etc.

$$P_{LL} = P_J + P_{EC} + P_{SL} \quad (2)$$

Las pérdidas P_J se deben a la corriente nominal, cuando ésta fluye a través de la resistencia de los devanados (efecto Joule). También se les conoce como pérdidas óhmicas o pérdidas óhmicas en DC. Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado del valor eficaz de la corriente de carga, incluyendo las componentes armónicas, pero es independiente de la frecuencia. Ellas se determinan midiendo la resistencia en DC de los devanados y calculando las pérdidas resultantes, utilizando para ello la corriente de plena carga de los devanados.

No se dispone de un método de ensayo que permita separar las pérdidas P_{EC} de los devanados con respecto a las pérdidas adicionales (P_{SL}). En su lugar, se determina la suma total de P_{EC} y P_{SL} , restando a las pérdidas totales de carga (P_{LL}) las pérdidas P_J .

$$P_{EC} + P_{SL} = P_{LL} - P_J \quad (3)$$

Se asume que P_{EC} varía con el producto del cuadrado del valor eficaz de la corriente por el cuadrado de la frecuencia, como se muestra en la fórmula siguiente [8]:

$$P_{EC} = P_{EC,R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (4)$$

donde:

- h: orden del armónico (1, 2, 3,...h_{max})
- h_{max}: máximo orden del armónico a ser considerado
- I_h: valor eficaz del armónico h-ésimo de corriente (en amperios),
- I_R: corriente nominal (en amperios),
- P_{EC,R}: pérdidas por corriente de *eddy* a corriente y frecuencia nominales.

También se supone que las pérdidas adicionales (P_{SL}) son proporcionales al cuadrado del producto del valor eficaz de la corriente por la frecuencia (orden del armónico), tal como se ve en la siguiente fórmula [8]:

$$P_{SL} = P_{SL,R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (5)$$

donde P_{SL,R} representa a las pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominales.

4. K-FACTOR Y FACTOR K

4.1. K-Factor

A la hora de tomar en cuenta el incremento de las pérdidas debido a la frecuencia y su influencia en la selección de un transformador para una aplicación que involucre cargas no lineales, básicamente se utilizan dos enfoques. El primero (propuesto por los fabricantes de transformadores americanos, junto con el *Underwriters' Laboratories* de Estados Unidos) consiste en calcular el factor de incremento de las pérdidas por corrientes de *eddy* en los conductores (y no en el núcleo) y especificar un transformador capaz de manejar esas pérdidas. Éste es el llamado "K-Factor", cuya fórmula es la siguiente [7]:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (6)$$

Obsérvese que, con esta definición, para una carga lineal (lo que implica una corriente perfectamente sinusoidal), el K-Factor es igual a la unidad.

Si se define una corriente armónica en por unidad (de la corriente total):

$$I_{hpu} = \frac{I_h}{I_R} \quad (7)$$

se llega a otra versión equivalente, también muy popu-

lar, del K-Factor [7]:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_{hpu})^2 h^2 \quad (8)$$

Después de que se conoce el K-Factor de la carga, a la hora de seleccionar el transformador que va a alimentarla, se especifica uno que por diseño tenga un valor de K-Factor mayor. Los valores normalizados para los fabricantes de esta clase de transformadores son K = 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50. El diseño de los transformadores que tienen un K-Factor especificado en placa es tal, que se minimizan las pérdidas por corrientes de *eddy* en los conductores, entre otras cosas. Vale la pena mencionar que este factor ha llegado a popularizarse de tal manera que, hoy en día, muchos medidores de calidad de energía proporcionan directamente su valor.

Un ejemplo de cálculo en donde se emplea el K-Factor en la evaluación de cuánto debe disminuirse la corriente nominal de un transformador debido a la presencia de armónicos es el siguiente (valores tomados de *Copper Development Association* [9]). Considérese un transformador cuyo fabricante suministra los datos de las pérdidas por efecto Joule en los devanados (P_J), en el núcleo (P_C) y la suma de las pérdidas por corrientes de *eddy* en los conductores, junto con las adicionales (P_{EC} y P_{SL}, respectivamente), todos en función de la potencia total de pérdidas (P_T): P_J = 0.79 P_T, P_C = 0.12 P_T y P_{EC} + P_{SL} = 0.09 P_T.

Las pérdidas en el núcleo no varían ni con la corriente de carga ni con la frecuencia; por lo tanto, el cálculo debe referirse únicamente al restante 0.88 P_T, correspondiente a las pérdidas P_J (P_J = 0.79 P_T, en el presente ejemplo) y P_{EC} + P_{SL} (P_{EC} + P_{SL} = 0.09 P_T). Cuando el transformador maneja corrientes distorsionadas, se incrementan las pérdidas P_{EC} + P_{SL} en forma proporcional al K-Factor (si se mantiene la corriente nominal); entonces, en el caso de corrientes distorsionadas, habrá que disminuir la corriente máxima de carga, de manera de mantener constante el total de las pérdidas asociadas a la corriente de carga (0.88 P_T en el presente ejemplo).

$$0.09 P_T \left(\frac{I}{I_R} \right)^2 K + 0.79 P_T \left(\frac{I}{I_R} \right)^2 = 0.88 P_T \quad (9)$$

donde I_R es la corriente nominal del transformador e I (menor que I_R) es el valor eficaz de la corriente deformada para la cual las pérdidas son iguales a las originales, para corriente sinusoidal y frecuencia nominal.

De (9) resulta:

$$\frac{I}{I_R} = \sqrt{\frac{88}{9K + 79}} \quad (10)$$

Si K toma los valores normalizados mencionados anteriormente, se obtiene la Tabla I, la cual permite comparar el grado de reducción de la corriente admisible por el transformador, en función del valor del K-Factor.

Tabla 1. Máximo valor eficaz de la corriente distorsionada.

K-Factor	4	9	13	20	30	40	50
I / I _R	0.88	0.74	0.67	0.58	0.50	0.45	0.41

Se observa que la corriente eficaz admisible (I) disminuye progresivamente, en la medida en que aumenta el K-Factor, es decir, cuando se incrementa el contenido de armónicos de la corriente circulante.

4.2. Factor K

El otro método para tomar en cuenta las pérdidas que varían con la distorsión de la corriente es el utilizado en Europa, basado en la norma BS EN 50464-3: 2007 [4], el cual fue originalmente estandarizado en Inglaterra (norma BS 7821-4: 1995 [3]). El mismo utiliza el llamado Factor K, en lugar del K-Factor.

El Factor K es un factor por el cual se debe dividir la corriente nominal del transformador para obtener la máxima corriente distorsionada que puede manejar éste sin exceder las pérdidas máximas tolerables a corriente y frecuencia nominales. Entonces:

$$\text{Factor K} = \frac{I_R}{I} \quad (11)$$

$$\text{Factor K} = \sqrt{1 + \frac{e}{1 + e} \left(\frac{I_1}{I_R}\right)^2 \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} \left[h^q \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \right]} \quad (12)$$

Según la norma [4]:

donde:

e: relación $(P_{EC} + P_{SL}) / P_J$,

h: orden del armónico,

q: parámetro experimental que depende del tipo del devanado (típicamente entre 1.5 y 1.7),

I_h: valor eficaz del h-ésimo armónico.

Para tratar de comprender el significado de la

expresión (12), a partir de las consideraciones manejadas en la sección anterior, se puede hacer el siguiente desarrollo:

$$P_{LL} = (P_{EC} + P_{SL}) + P_J = (e + 1) P_J \quad (13)$$

La ecuación (13) es válida bajo condiciones nominales de corriente y voltaje (sin distorsión). Cuando la corriente está distorsionada, su máximo valor eficaz se debe reducir, a fin de mantener constante este valor de P_{LL} y evitar así daños al transformador.

Para corriente distorsionada, la ecuación (13) debe modificarse de la siguiente manera:

$$P_{LL} = (K e + 1) \left(\frac{I}{I_R}\right)^2 P_J \quad (14)$$

Igualando (13) y (14) y simplificando se obtiene:

$$\left(\frac{I_R}{I}\right)^2 = \frac{1 + K e}{1 + e} \quad (15)$$

Reacomodando la ecuación (6) se obtiene:

$$K = 1 + \frac{\sum_{h=2}^{h=h_{\max}} (h^2 - 1) I_h^2}{I^2} \quad (16)$$

Multiplicando y dividiendo por I₁² (valor eficaz de la fundamental) se llega a:

$$\left(\frac{I}{I_R}\right)^2 = \frac{1 + e + e \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} (h^2 - 1) \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}{1 + e} \quad (17)$$

De (17) se obtiene:

$$\left(\frac{I}{I_R}\right)^2 = 1 + \frac{e}{1 + e} \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} (h^2 - 1) \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \quad (18)$$

Hasta aquí, el desarrollo se ha hecho utilizando un enfoque muy parecido al del K-Factor americano. Sin embargo, según el método de los organismos ingleses, se le debe quitar peso a los armónicos, ya que, en lugar de usar el factor $(h^2 - 1)$ se emplea h^q , donde q es un factor empírico, que depende del tipo de devanado, ubicándose su valor, por lo general, entre 1.5 y 1.7.

Aplicando este último criterio y extrayendo la raíz cuadrada del cociente, se obtiene la expresión del Factor K (ecuación (12)), tal como se le define en la norma europea [4].

Al comparar el enfoque americano con el europeo, queda claro que en el caso del K-Factor, lo que se busca es asociar un valor de K a la corriente distorsionada, el cual se utiliza para seleccionar un transformador que, por diseño, sea capaz de manejar este exceso de pérdidas sin sufrir menoscabo en su vida útil. En cambio, en el enfoque europeo, lo que se pretende es encontrar un factor de desclasificación o *derating* (Factor K), que se aplique al transformador que está alimentando la carga no lineal.

La desclasificación de un determinado transformador de acuerdo con la norma europea siempre será menor a la obtenida con la norma americana, ya que, como se dijo anteriormente, en el enfoque europeo la ponderación del efecto de los armónicos de la corriente se reduce.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de disponer de datos veraces con respecto a los eventuales problemas causados por los llamados bombillos ahorradores de energía en los transformadores de distribución, se diseñó un conjunto de pruebas en donde se utilizaron bombillos CFL de las marcas comerciales más difundidas en el país. En la Fig. 1 se muestra el banco de pruebas utilizado, mientras que en la Fig. 2 aparece el diagrama de bloques del esquema de medición empleado.

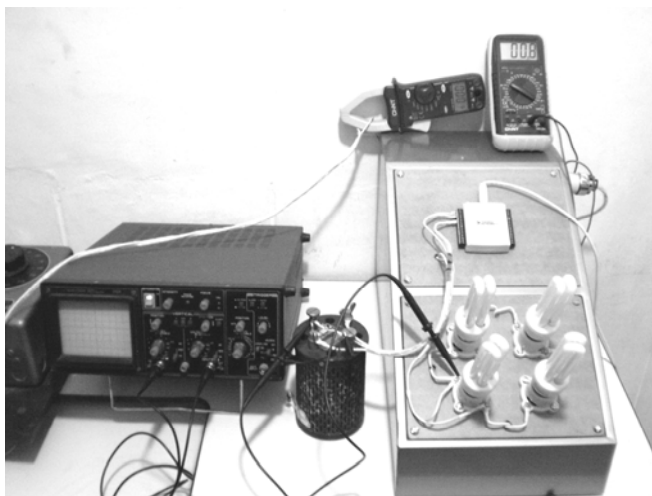


Figura 1. Banco de Pruebas.

Se dispuso de cinco marcas comerciales de CFL, de cada una de las cuales se tomó una muestra de tres bombillos que se conectaron en paralelo, la

cual fue sometida a cuatro ensayos a diferentes voltajes (94 V, 105 V, 117 V y 129 V). En estos experimentos los datos fueron capturados utilizando el sistema de adquisición de datos NI USB-6008, a 10 kS/s y doce bits de resolución DAC. Estos datos fueron procesados mediante el software MATLAB, de manera de reproducir en el computador las formas de onda de la corriente absorbida por los bombillos, así como su espectro frecuencial, junto con el cálculo del THD y K-Factor.

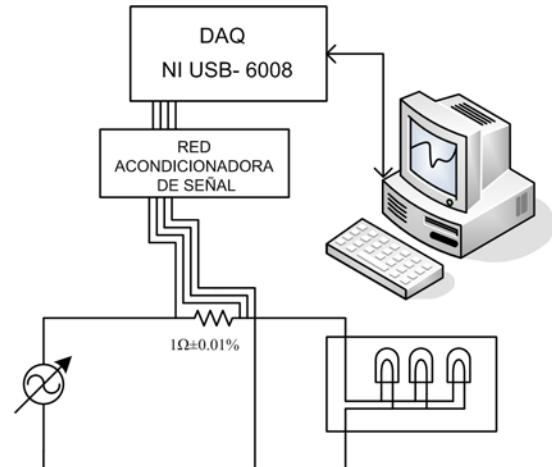


Figura 2. Diagrama de bloques del banco de pruebas .

A manera de ejemplo, en las Figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran los resultados correspondientes a los ensayos realizados con aquellas marcas que proporcionaron los mejores y los peores resultados (con base en el K Factor), respectivamente, cuando el voltaje aplicado era de 117 V.

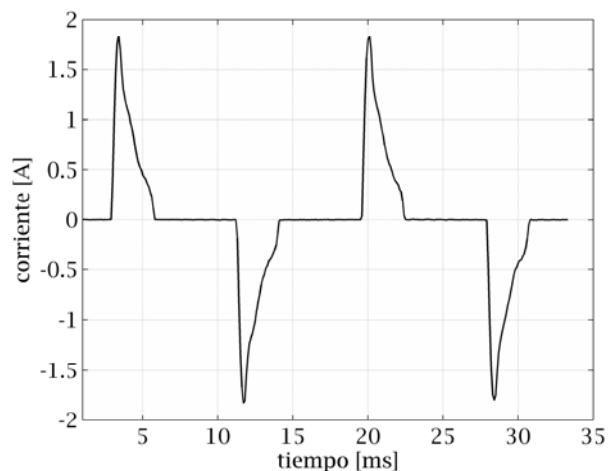


Figura 3. Forma de la onda de corriente (caso más favorable).

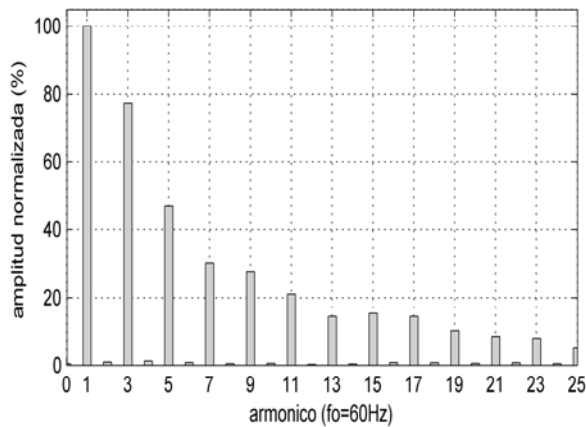


Figura 4. Espectro de magnitud de la corriente (caso más favorable).

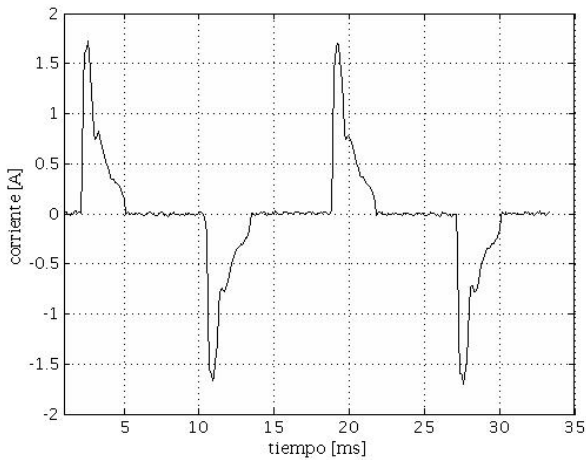


Figura 5. Forma de la onda de corriente (caso menos favorable).

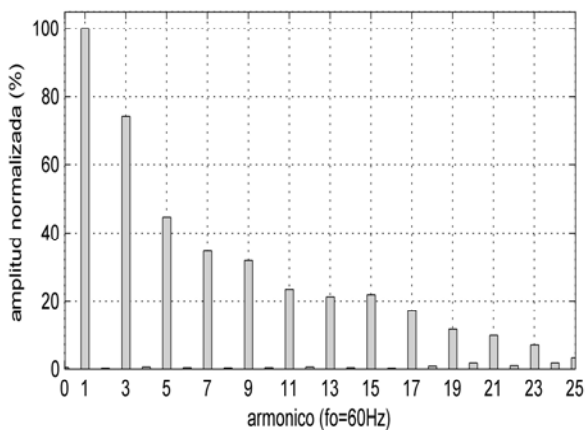


Figura 6. Espectro de magnitud de la corriente (caso menos favorable).

Como comprobación de la calidad de las ondas reproducidas en el computador, las mismas se compararon con las obtenidas mediante un osciloscopio, obteniendo resultados totalmente satisfactorios. Una muestra de estas mediciones se presenta en la Fig. 7.



Figura 7. Onda reproducida en la pantalla del osciloscopio de CRT.

Los datos experimentales aportados en cada caso se utilizaron en el cálculo del THD_1 y el K-Factor, cuyos resultados se resumen en las tablas 2 y 3.

Observando la tabla 3 se concluye que el K-Factor de este tipo de bombillo es bastante elevado, si se toma en cuenta que los mayores valores normalizados para los transformadores con clasificación K (*K rated*) son 40 y 50. Esto indica que, ante la proliferación de este tipo de carga, los transformadores utilizados en el medio nacional deberían ser fuertemente desclasificados, lo cual no se viene haciendo, por lo que la vida útil de estos equipos se verá disminuida. Las tablas 2 y 3 permiten concluir que la distorsión armónica disminuye al ser menores los voltajes aplicados, condición de trabajo muy usual en nuestras redes de distribución, lo cual puede considerarse como un atenuante de los efectos negativos de los CFL sobre los transformadores.

6. CONCLUSIONES

Con este estudio se comprobó que los bombillos ahorradores de energía utilizados en los experimentos efectivamente representan una muy importante fuente de armónicos para las redes de distribución, con todas

Tabla 2. Resultados experimentales para el THD_I

THD _I (%)					
Voltaje (V)	Marca A	Marca B	Marca C	Marca D	Marca E
94	84.6	94.8	98.1	104.2	102.6
105	88.8	99.6	102.5	107.8	106.8
117	91.4	100.8	105.9	110.4	108.5
129	95.1	103.8	106.6	113.9	114.9

Tabla 3. Resultados experimentales para el K-Factor.

K-Factor					
Voltaje (V)	Marca A	Marca B	Marca C	Marca D	Marca E
94	17.3	19.9	17.1	23.1	26.6
105	17.5	24.5	21.6	24.7	29.2
117	19.0	24.3	25.2	25.1	32.3
129	21.8	24.8	25.5	28.5	41.8

las consecuencias negativas que ello acarrea. Sin embargo, dado que estos bombillos siempre forman parte de un sistema eléctrico más amplio que incluye cargas lineales, la distorsión total de la corriente circulante a través de los transformadores será inferior al caso en el cual la carga sea exclusivamente de bombillos CFL. En este tipo de situaciones, el K del sistema total es muy difícil de evaluar teóricamente, por lo cual la manera más práctica de hacerlo es con un medidor de calidad de energía adecuado.

Para instalaciones nuevas, resulta más fácil aplicar el enfoque americano (K-Factor), basado en seleccionar un transformador con un K de diseño superior o igual al de la carga. En cambio, en el caso de instalaciones existentes, es preferible aplicar la desclasificación que proporciona el Factor K inglés.

Aplicar un criterio de desclasificación genérico para cualquier tipo de transformador resulta peligroso, ya que los cálculos varían mucho dependiendo del diseño. Desde este punto de vista, es más conveniente el enfoque americano, el cual no está dirigido a desclasificar, sino a la instalación desde un principio de un transformador que, por diseño y bajo garantía del fabricante, puede manejar todas las pérdidas adicionales ocasionadas por los armónicos de la corriente circulante.

Es conveniente aclarar que la desclasificación del transformador sólo ayuda a conservar la vida útil del mismo, con base en su sobredimensionamiento. No obstante, esto no resuelve el problema de fondo de los armónicos de la corriente circulante, los cuales pueden ocasionar deformaciones del voltaje, trayendo como consecuencia el eventual funcionamiento defectuoso de equipos electrónicos sensibles. A tal efecto se deben explorar soluciones alternativas, como la inclusión de filtros, bien sea en el interior de las luminarias o en las redes de alimentación.

A partir de nuestros resultados experimentales, se comprobó que las marcas comerciales de bombillos CFL distribuidas en el mercado nacional presentan grandes variaciones en cuanto al nivel de distorsión introducido y al K-Factor. En este sentido, los autores consideran que se debería incentivar el uso de aquellas marcas con mejores registros.

Agradecimiento

Esta investigación pudo ser realizada debido al patrocinio de la empresa ELECTRICIDAD ESPECIALIZADA, S. A. (ELECSA), dentro del marco de la Ley Orgánica de Ciencia y Tecnología.

7. REFERENCIAS

- [1] De la Rosa, F. "Harmonics and power systems", CRC, USA, 2006.
- [2] Daut, I., Syafruddin, H., Roznasri, A., Samila, M., Haziha, H. "The effects of harmonic components on transformer losses of sinusoidal source supplying non-linear loads". American Journal of Applied Sciences, 3 (12), 2006.
- [3] IEEE C57.110-1998. "Recommended practice for establishing transformer capability when supplying non-sinusoidal currents". New York, USA, 1999.
- [4] BS 7821-4: 1995. "Three phase oil-immersed distribution transformers, 50 Hz, from 50 to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV. Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents". UK, 1995.
- [5] BS EN 50464-3: 2007. "Three phase oil-immersed distribution transformers, 50 Hz, from 50 to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV. Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents". Bruselas, Bélgica, 2007.
- [6] Gonos, I., Kostic, M., Topalis, F. "Harmonic distortion in electric power systems introduced by compact fluorescent lamps". International Conference on Electric Power Engineering, 1999, PowerTech Budapest 99.
- [7] Jayasinghe, N., Lucas, J., Perera, K. "Power system harmonic effects on distribution transformers and new design considerations for K factor transformers". IEE Sri Lanka Annual Sessions, 2003.
- [8] Kulkarni, S., Khaparde, S. "Transformer Engineering: Design and Practice". CRC Press, USA, 2004.
- [9] Copper Development Association. "K Rating of Transformers supplying Harmonic Rich Currents". Consulta en Internet: www.cda.org.uk.