

Estudio comparativo de características eléctricas y fotométricas de LEDs de iluminación de estado sólido y CFLs para iluminación interior

Comparative study of electrical and photometric characteristics of solid-state lighting LEDs and CFLs for indoor lighting

Diego F. Castañeda
Seringel Ltda
diefercasgo@gmail.com

Germán A. Sáenz
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
germans_3091@hotmail.com

Hugo A. Cárdenas
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
hacardenasf@udistrital.edu.co

El presente artículo muestra la comparación de características eléctricas y fotométricas para dos eficientes tecnologías de iluminación interior, las CFLs (Lámparas Fluorescentes Compactas, CFLs, por sus siglas en inglés *Compact Fluorescent Lamp*) y las recientes lámparas tipo LED (*Light-Emitting Diode*: diodo emisor de luz) o SSL (*Solid State Lighting*: iluminación de estado sólido), en donde se confrontan tres muestras de cada tecnología con características similares de potencia y flujo luminoso, también realizan las mediciones de parámetros eléctricos con el fin de analizar y comparar distorsión armónica, factor de potencia, potencia y desempeño energético. Además de esto, se realiza un diseño de iluminación a una vivienda que contribuya con el desarrollo de la comparación fotométrica.

Palabras clave: CFL, distorsión armónica, eficacia, factor de potencia, flujo luminoso, fotometría, LED, potencia

This paper presents a comparison of electrical and photometric features for two efficient indoor lighting technologies, CFLs (Compact Fluorescent Lamps) and the recent LED lamps (Light-Emitting Diode) or SSL (Solid State Lighting), where one of three samples of each technology are confronted with similar power and luminous flux, also perform measurements of electrical parameters to analyze and compare harmonic distortion, power factor, power and energy performance. Besides, it performs a lighting design to a home that contributes to the development of photometric comparison.

Keywords: CFL, effectiveness, harmonic distortion, LED, luminous flux, photometry, power, power factor

Introducción

El presente documento describe el estudio comparativo entre LEDs y CFLs para iluminación interior, que nace a partir del conocimiento en cuanto a generación de armónicos, propio de CFLs, además de la eficacia energética que puedan presentar. Por otra parte, el desconocimiento teórico de las características eléctricas y de eficacia que ostenta la tecnología LED, que hacen pensar que pudieran remplazar el reinado del mercurio.

El motivo principal de este artículo es comprobar la existencia de distorsiones armónicas de un foco LED de iluminación interior, ya que podría ser una opción para sustituir la tecnología que se está utilizando actualmente en

la iluminación de los hogares. En la segunda parte, se busca evaluar el comportamiento fotométrico para observar cuál tecnología presenta mayores índices de eficacia.

Para formar una buena comparación de estas tecnologías, el estudio lleva consigo analizar aspectos como características eléctricas, flujo luminoso y características fotométricas. Las pruebas y mediciones que se llevaron a cabo en el Laboratorio Ensayos Eléctricos Industriales - LABE de la Universidad Nacional y los Laboratorios de Electricidad de la Universidad Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica.

Se siguen las normas y consejos dispuestos por DOE (Departamento de Energía de EE.UU., DOE por sus siglas en inglés *Department of Energy*), CALiPER (ENERGY.GOV,

2011) y ENERGY STAR (ENERGY STAR, 2011) pertinentes a SSL y normas ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación) para las CFLs.

Metodología

La clasificación de la muestra se basó en la tendencia mundial actual en iluminación doméstica y realizando una exploración en cuanto a los últimos avances, se encontró que la tecnología LED puede llegar a desplazar a las CFLs. Por lo anterior, se decidió adquirir una muestra de tres bombillas tipo LED y sus cercanas equivalencias en potencia para CFLs.

Para dar comienzo al estudio, se tomaron referencias de las normas NTC 4359 (ICONTEC, 1997), IESNA-LM66 (IESNA, 2000) y ANSI C78.5-2003, de fluorescentes compactas, que describen los protocolos, características de los equipos de medición y montajes, para la toma de parámetros eléctricos y fotométricos que se muestran en la tabla 1 y 2.

Tabla 1

Características nominales de LEDs.

Descripción LED	Potencia Nominal (W)	Tensión Nominal (V)	Flujo Nominal (lm)	Vida Nominal (Horas)	Temperatura de color (K)
1. LED 8,5W	8,5	120	420	24966	2700
2. LED 9W	9	120	450	25185	3000
3. LED 12,5W	12,5	120	800	25000	3000

Tabla 2

Características nominales de CFLs.

Descripción CFL	Potencia Nominal (W)	Tensión Nominal (V)	Flujo Nominal (lm)	Vida Nominal (Horas)	Temperatura de color (K)
4. CFL 8W	8	120-127	375	10000	6400
5. CFL 9W	9	120	450	8000	6500
6. CFL 15W	15	110-130	800	5913	2700

Fecha recepción del manuscrito: Octubre 17, 2012

Fecha aceptación del manuscrito: Diciembre 10, 2012

Diego F. Castañeda, Seringel Ltda; Germán A. Sáenz, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Hugo A. Cárdenas, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Esta investigación fue financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Correspondencia en relación con el artículo debe ser enviada a: Diego F. Castañeda. Email: diefercasgo@gmail.com

Criterios para la obtención de características eléctricas y fotométricas

Las normas de iluminación LM 79 (IESNA, 2007) y LM 80 (IESNA, 2008) para SSL, establecen similares condiciones y procedimientos para las mediciones, que son necesarias en el estudio, cuya única diferencia encontrada fue en la parte del envejecimiento, que no es necesaria para los LED, mientras las CFLs tienen que ser sometidas a una pre estabilización de 20 horas a causa del mercurio que contienen.

Otra de las razones que justificó el uso de las normas para CFLs, fue la acreditación que posee el LABE, quien fue el encargado de la obtención de los parámetros fotométricos, el cual se encuentra acreditado con el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), respecto a los requisitos mencionados en la norma Internacional ISO/IEC 17025:2005.

Desempeño energético. En Colombia el desempeño energético de una bombilla está establecido por las normas NTC 5100 (ICONTEC, 2002a), NTC 5101 (ICONTEC, 2002b), que señalan los valores de eficacia, desempeño y etiquetado, rangos de clasificación, entre otras características, donde el fabricante debe diseñar un etiquetado claro para el consumidor con las especificaciones de la Fig. 1.

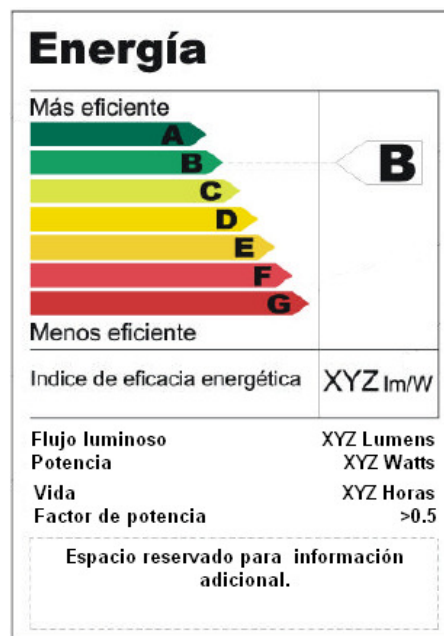


Figura 1. Etiquetado colombiano para bombillas fluorescentes compactas (ICONTEC, 2002b).

Las luminarias tipo LED tienen un etiquetado creado por la Comisión Federal de Comercio de EE.UU. en el 2011, en el cual la etiqueta, Fig. 2, debe incluir el flujo luminoso, el costo de energía que consume en el año, la vida útil,

temperatura de color, y potencia, en ese orden, la etiqueta debe mencionar si la lámpara contiene mercurio o no.

Lighting Facts Per Bulb	
Brightness	870 lumens
Estimated Yearly Energy Cost	\$1.57
Based on 3 hrs/day, 11¢/kWh Cost depends on rates and use	
Life	5.5 years
Based on 3 hrs/day	
Light Appearance	2700 K
Warm ————— Cool	
Energy Used	13 watts
Contains Mercury	
For more on clean up and safe disposal, visit epa.gov/cfl .	

New Back Label for Bulbs Containing Mercury

Figura 2. Etiquetado emitido por EnergyStar y DOE para EE.UU. (DOE, 2011)

Los nuevos estándares de etiquetado fueron aprobados por el congreso de EE.UU., con el objetivo de eliminar las tradicionales bombillas incandescentes del mercado, ya que en el nuevo etiquetado, los consumidores toman su decisión de compra en función de las características de flujo, y el costo de la energía que consume la lámpara, debido a que estas dos características resaltan en este nuevo etiquetado.

Para la muestra en estudio de tres bombillas tipo LEDs y tres CFLs, la clasificación se determinó a partir de las fórmulas dadas por la NTC 5101 (ICONTEC, 2002b) numeral 4.1.

Con los datos obtenidos en la medición de flujo luminoso entregados por el LABE, se hizo la clasificación para cada bombilla en las dos tecnologías, teniendo en cuenta el procedimiento de la NTC 5101 (ICONTEC, 2002b) y los criterios de conformidad 4.9 y 4.11 de la ANSI C 78.5.2003 (ANSI, 2003), donde dice que el flujo luminoso inicial no debe ser menor al 90 % del flujo nominal y el valor de eficacia debe ser mínimo de 40 lm/W.

Pesos por iluminación. Constantemente, el mercado es invadido por infinidad de productos de primera, segunda o tercera necesidad que en ocasiones son de dudosa calidad, ya sea por su poco tiempo de reconocimiento en el mercado o su bajo costo. Con el cálculo de pesos por iluminación (UPME y UNAL, 2008), se esclarece este criterio para el consumidor otorgándole el beneficio de conocer el precio de la bombilla más económica en función de algunas de sus características.

La propuesta fue realizada por la Universidad Nacional de Colombia en el 2008, en la *Caracterización técnica de las bombillas para uso interior comercializadas en Colombia*,

donde para generar este indicador se debe tener en cuenta el costo de compra de la bombilla, el costo de la energía que consume a lo largo de su uso, potencia, eficacia y vida útil. A partir de las fórmulas dadas por la NTC 5101 (ICONTEC, 2002b) numeral 4.1, se representa el indicador se muestra a continuación (ecuación 1 y 2):

$$\frac{\$}{\text{Iluminación}} = \frac{Q}{\Phi \times t} \quad (1)$$

$$Q = C \times 1000 + P \times t \times \left(\frac{\$}{\text{kWh}} \right) \quad (2)$$

Donde:

- Q = Costo de la bombilla más costo de la energía consumida.
- C = Precio de compra de la bombilla en pesos colombianos.
- P = Potencia nominal de la bombilla en vatios.
- Φ = Flujo luminoso en Lúmenes.
- t = Vida útil de la bombilla en horas.
- $\$/\text{kWh}$ = Precio de la energía en $\$/\text{kWh}$.

Comparación fotométrica

La fotometría comprende la medición de cantidades asociadas con la luz, las cuales son: flujo luminoso, intensidad luminosa, iluminancia y luminancia. Estos valores serán tomados por un goniofotómetro LMT GO-DS 1000. Para el caso de la comparación, se escogió la bombilla que presenta una mejor eficacia en cada tecnología, es decir, se eligió la lámpara (6) CFL 15 W y la (3) LED 12.5 W.

Los resultados obtenidos durante las pruebas fueron consignados en un archivo, donde se aprecia la matriz de intensidades lumínicas, que representan los planos C y ángulos γ (Gama), que constituyen los diagramas polares de cada lámpara, los cuales se utilizaron para incorporarlos en el software DIALux 4.9, en el cual se evaluó el desempeño de cada tecnología. El método utilizado se basó en evaluar cada lámpara en un mismo recinto, eligiendo una casa de estrato tres, la que comprende siete escenarios distintos con niveles de iluminación normalizados.

Diseño de iluminación comparativo entre CFL y LED para una casa

En esta parte, se describen los principales requisitos de diseño y cálculos de iluminación interior a tomar en cuenta en una casa. Para obtener una buena comparación de las tecnologías, se observarán los requisitos generales del diseño de alumbrado interior exigidos por el RETILAP (MinMinas, 2010) en la sección 4.10, y complementados por la norma ISO 8995 (ISO, 2002).

Inicialmente, se definirá el nivel de iluminancia requerido encada lugar de la casa, según las tareas a realizar; posteriormente, se evaluará el nivel máximo de UGR (índice

de deslumbramiento unificado), el valor máximo de VEEI (Valor de eficacia energética de la instalación), y por último, la uniformidad que tiene como fin, evitar las molestias debidas a los cambios bruscos de iluminancia en un puesto donde se realiza una tarea a la iluminación general del área circundante, que se define como iluminación promedio sobre la mínima (E_m/E_{min}), cuyo valor mínimo en el área de trabajo debe ser de 0,5 y para el circundante de 0,4, quedando resumido en la tabla 3.

Tabla 3

Tabla resumen promedio de iluminación.

TIPO DE RECINTO	UGR	VEEI W/m ² lx	NIVELES DE ILUMINANCIA (LX)		
			Mínimo	Medio	Máximo
Habitación	22	12	50	100	150
Sala	22	10	150	200	300
Comedor	22	10	150	200	300
Cocina	25	5	200	300	500
Escaleras	25	4,5	100	150	200
Pasillo	28	4,5	50	100	150
Baño	25	5	100	150	200

Resultados

Ejecución de mediciones eléctricas

Al realizar las pruebas eléctricas fue necesario acondicionar la señal de alimentación con una UPS SU1500XL, de tal modo que para energizar las luminarias se garantizara que la tensión nominal de alimentación en el valor nominal de no más del 10 % ó 0,5 voltios (ANSI C78.5-2003[20]), además de tener una forma de onda tal que la suma del valor eficaz de los componentes armónicos (THD-v) no debe exceder el 3 % de la fundamental (NTC 4359[14]). Con las dos condiciones anteriores como premisa inicial, fue necesario determinar el THD de la fuente a usar que en este caso, fue de 0.7 % usado como fuente de alimentación la UPS SU1500XL.

Los valores de las variables medidas en las luminarias se aprecian en las tablas 4, 5 y 6. Fueron obtenidos con base al proceso de pre quemado de 20 horas, recomendado por la LM-66 (IESNA, 2000), al cual fueron sometidas las CFLs. Posteriormente, se encendieron por un periodo de cinco horas. Luego fueron apagadas por un lapso de 15 minutos y después, llevadas al instrumento de medición en la misma posición, base arriba, manteniendo una temperatura de $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Comparación de distorsión armónica y Factor de Potencia entre CFLs y LEDs

La distorsión armónica, el factor de potencia y la potencia, son características eléctricas de vital importancia en el dimensionamiento de un circuito. Variados tipos de electrodomésticos que tienen componentes electrónicos son

Tabla 4

Mediciones de características eléctricas en LEDs.

Descripción LED	Vin (V)	Vb (V)	Ib (A)	Pb (W)	THD-I (%)	THD-V (%)	FP
1. LED 8,5W	120,06	120	0,0755	8,72	16,9	0,92	0,9628
2. LED 9W	120,06	120,01	0,068	8,09	8,26	0,89	0,9914
3. LED 12,5W	120,04	119,95	0,1317	12,44	76,09	1,01	0,7875

Tabla 5

Mediciones de características eléctricas en CFLs.

Descripción CFL	Vin (V)	Vb (V)	Ib (A)	Pb (W)	THD-I (%)	THD-V (%)	FP
4. CFL 8W	120,01	119,94	0,1073	7,08	132,24	1,31	0,5504
5. CFL 9W	120,04	119,95	0,1313	8,77	132,95	1,39	0,5572
6. CFL 15W	120,05	119,94	0,1938	14,2	104,02	1,45	0,6109

los principales responsables de introducir impurezas a la red, generando impactos negativos en electrodomésticos sensibles a cambios de frecuencia, y lo más preocupante, la afectación a transformadores de la red. Una atribución negativa que tienen los componentes electrónicos, es el desfase que produce entre las señales de tensión y corriente conocido con el nombre de factor de potencia, y que en circuitos con contenido armónico, es la relación entre la potencia activa y potencia reactiva.

En Colombia, según el Ministerio de Minas y Energía, se deben cumplir con los valores de Factor de Potencia y distorsión de la tabla 7, punto de referencia que se tomaron para ambas tecnologías.

Tabla 7

Especificaciones de bombillas o lámparas fluorescentes compactas con balasto incorporado según RETILAP (MinMinas, 2010).

Potencia en W de la bombilla o lámpara LFC	Mínimo factor de potencia	Máxima distorsión total de armónicos THD-I
≤ 8	0,5	150%
$8 < P \leq 15$	0,5	150%
$15 < P \leq 25$	0,5	150%
$25 < P \leq 45$	0,5	150%
> 45	0,8	120%

Para este estudio, se conoce de antemano que las CFLs generan un alto contenido de distorsión, aunque funcionando en conjunto hay una reducción de este fenómeno; por otra parte, se observa el desconocimiento sobre la existencia de armónicos en las bombillas tipo LED, debido a su reciente uso y propagación en el mercado, lo cual fue una de las principales inquietudes para desarrollar este estudio. Con el objetivo de dar respuesta a esta inquietud, se realizaron las mediciones con el analizador FLUKE 435, teniendo en cuenta las conexiones de instrumentos establecidas por la NTC4359 (ICONTEC, 1997) mostrada en la Fig. 5, obteniendo los datos presentados en la tabla 4, 5 y 6. De

Tabla 6

Mediciones de características en conjunto.

Características	Vin (V)	Vb (V)	Ib (A)	Pb (W)	THD-I (%)	THD-V (%)	FP
Conjunto de tres CFLs en paralelo	120,03	119,99	0,4	28,78	104	0,44	0,59
Conjunto de tres LEDs en paralelo	120,02	119,98	0,27	30,08	29,4	0,42	0,91
Conjunto de tres CFLs y tres LEDs en paralelo	120	119,94	0,57	55,57	58,4	1,45	0,81

la Fig. 3 y Fig. 4, se representa la comparación de las magnitudes eléctricas evaluadas en cada luminaria, y la configuración de conexión utilizada en la Fig. 5.

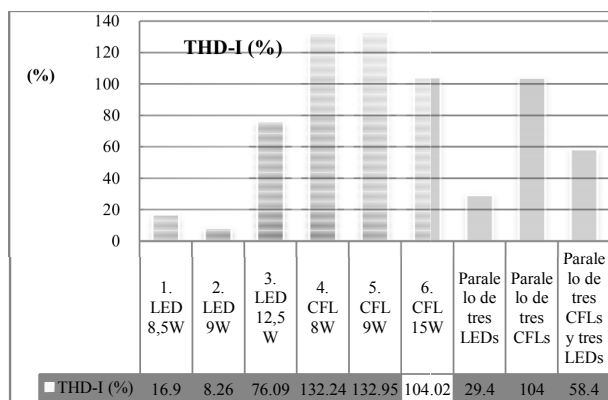


Figura 3. Comparación de THD-I.

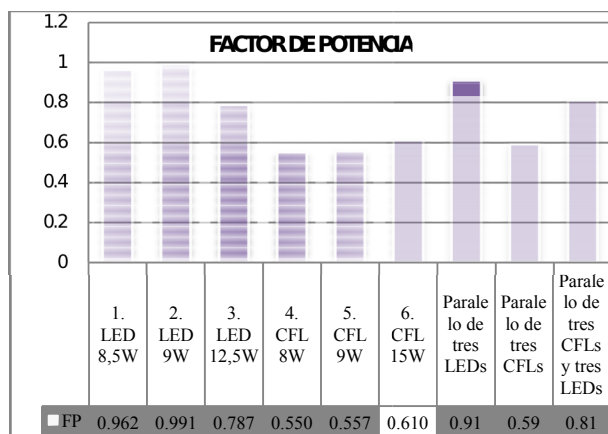


Figura 4. Comparación de FP.

Realizando la comparación entre los valores de THD-V y factor de potencia, respecto a lo que establece el Ministerio de Minas y Energía, se observa que las seis bombillas de la muestra cumplen los valores mínimos de factor de potencia y los valores máximos de distorsión de corriente.

Los valores de potencia, Factor de Potencia, THD-I y THD-V, fueron obtenidos del analizador de red y examinados mediante serie trigonométrica de Fourier (Castañeda y Sáenz, 2012).

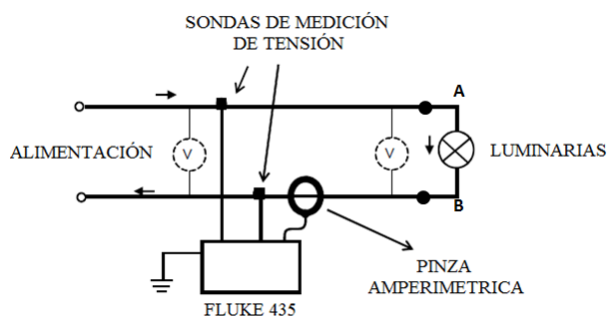


Figura 5. Conexión de instrumentos.

En primer lugar, se realizó la comparación entre las bombillas 1 con 4, y 2 con 5, donde confrontando los valores de Factor de Potencia se observa un comportamiento altamente resistivo y ligeramente capacitivo por parte de 1 y 2, con un valor cercano a 0,96 para las luminarias tipo LED. Mientras tanto, 4 y 5 presenta un comportamiento fuertemente capacitivo, obteniendo un Factor de Potencia cercano a 0,55.

Para la tercera comparación entre las lámparas (3) LED 12.5 W y (6) CFL 15 W, con los valores de factor de potencia medidos, se observa un comportamiento capacitivo por ambas partes, aunque más acentuado en la (6) CFL 15W con un valor de 0,61. Cabe resaltar que su tecnología es la que presenta una menor distorsión armónica en la señal de corriente y un favorable Factor de Potencia, pese a estas características la (6) CFL 15 W no es comparable con la (3) LED 12,5 W, quien obtuvo un valor de Factor de Potencia de 0,78 y una distorsión armónica en la señal de corriente de 76,09 % frente a 104,02 % de la lámpara (6) CFL 15 W.

Similares resultados fueron encontrados al realizar la medición de distorsión armónica del analizador de red Fluke 435, obteniendo las gráficas (Castañeda y Sáenz, 2012) de armónicos, en donde las luminarias tipo LED tienen aportes relativamente insignificantes en los armónicos tercero, quinto y séptimo, en comparación con las CFLs que presentan una magnitud de más del 10 % en corriente en el quinceavo armónico.

Retomando, nuevamente, con las comparaciones entre 1 con 4 y 2 con 5, es evidente notar que para 1 y 2 el mayor aporte de distorsión lo hace en el tercer armónico,

sin superar el 10 % en magnitud de la señal fundamental, mientras que 4 y 5 muestran un aporte de un poco más del 80 % de la fundamental, para el mismo armónico y además, presentando una reducción en este comportamiento atípico hasta el armónico número 17, en donde el aporte a la señal es inferior al 10 %.

En las luminarias de mayor potencia (3 y 6) se notó un comportamiento similar para ambas, aunque con sensibles diferencias en aportes de magnitud menores para los mismos armónicos, en la lámpara tipo LED, y presentando una disminución de este efecto inferior al 10 % desde el armónico número 11 (Castañeda y Sáenz, 2012).

Por otra parte, es indiscutible el beneficio que la red eléctrica podría tener al hacer uso de bombillas tipo LED, debido a que en las bombillas (1) LED 8,5 W y (2) LED 9 W, presentan valores de Factor de Potencia cercanos a la unidad teniendo un comportamiento altamente resistivo.

El objetivo del presente trabajo, no es favorecer ninguna de las dos tecnologías, sino resaltar las características eléctricas y beneficios que conllevaría el uso masivo de un adecuado elemento de iluminación, además es deber como habitantes de este planeta, la evaluación de los beneficios ecológicos al hacer uso de cualquier materia prima o transformada. Por lo antes referido, es interesante analizar el comportamiento de ambas tecnologías por separado, es decir, estudiar la conexión en paralelo de tres bombillas tipo LEDs, las tres CFLs y en conjunto de las dos tecnologías.

La tabla 6 muestra los valores entregados por el analizador de calidad en la medición a las dos tecnologías por separado. De un lado, se observa que en las bombillas tipo LED ocurre un leve decaimiento en el Factor de Potencia frente al buen FP que tienen las dos primeras lámparas LED, mientras que el THD-I mejora considerablemente respecto a la peor de sus muestras ((3) LED 12.5 W). Para las CFLs, su Factor de Potencia tiene un ligero mejoramiento al igual que el THD-I.

En el comportamiento en conjunto CFLs y LEDs para las mediciones en paralelo por cada tecnología, se observa un mejoramiento en la señal de corriente (Castañeda y Sáenz, 2012), para las CFLs tendiendo a un valor de THD-I de 104 % y presentando una reducción considerable de este efecto a partir del armónico número 13, cosa que no sucedía con el comportamiento por separado de estas mismas luminarias.

Las lámparas tipo LED presentan un mejoramiento considerable de la señal de corriente trabajando en paralelo respecto a la peor de su muestra, consiguiendo un THD-I de 29,4 %, y presentando una atenuación de este efecto a partir del armónico número 7, y exhibiendo el mayor aporte en el armónico número 3, con apenas 25 % en magnitud de la señal fundamental contra un 80 % en magnitud, para el mismo armónico en las CFLs.

Estudios realizados en lámparas fluorescentes compactas a muestras más numerosas, trabajando en conjunto, han

arrojado como conclusión que en la implementación masiva de CFL, se presenta un mejoramiento en el Factor de Potencia, y por consiguiente, una disminución en la generación de distorsiones a la red, según (Brugnoni y Iribarne, 2006). También debido al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas, se concluye que, el aporte de contenido armónico a la red resulta mínimo, debido a la baja potencia de las lámparas y que en combinación con electrodomésticos, este efecto se ve altamente atenuado.

Dicho fenómeno, se transcribe en el trabajo presentado por la *NEMA Lighting Systems Division* bajo el título *Power Quality Implications of Compact Fluorescent Lamps in Residences*, donde se observa un aumento del Factor de Potencia y un mejoramiento notable de la forma de onda cuando se conectan 10 lámparas de la misma marca e idénticas etiquetas.

Con la medición en conjunto de tres luminarias LEDs y tres CFLs se quiere comprobar, lo anteriormente citado, claro está que las características de todas las lámparas son diferentes una respecto a la otra, pero para el caso práctico se observó que ocurre una atenuación considerable del THD-I y un mejoramiento del Factor de Potencia, para el trabajo en conjunto de CFLs con LEDs. Con lo mencionado se comprueba que la distorsión de la señal de corriente producida por las luminarias CFLs puede ser mitigada con la conexión de electrodomésticos o cargas con un comportamiento altamente resistivos.

Desempeño energético

Observando los datos de clasificación, fácilmente se aprecia que todas las lámparas en estudio se alojan en la categoría A, lo cual hace que ambas tecnologías sean apropiadas para el uso doméstico en este aspecto.

Por otra parte, es de resaltar que los valores de eficacia de una tecnología a otra varían sensiblemente, aunque adicional a esto, todas las lámparas de la muestra cumplen con el criterio de conformidad sobre eficacia mínima establecido en la NTC 5101 (ICONTEC, 2002b) numeral 4.2, y la mayoría de ellas cumplen con los criterios de conformidad 4.9 y 4.11 de la ANSI C78.5.2003 (ANSI, 2003), excepto la lámpara (4) CFL 8 W que no alcanza el 90 % del flujo nominal.

De las comparaciones planteadas entre 1 con 4, 2 con 5 y 3 con 6, la tecnología LED es sobresaliente en la característica de eficacia 0,45 lm/W, 7,78 lm/W y 11,78 lm/W, respectivamente, para cada confrontación. A partir de lo anterior, es notable el aprovechamiento de la energía en las bombillas tipo LED. Tal situación es más significativa en 6, de lo cual podría intuirse que en bombillas de mayor consumo la eficiencia en la tecnología LED será superior al de las CFLs (tablas 8 y 9).

Tabla 8

Eficacia de las bombillas tipo LEDs.

	1. LED 8,5W	2. LED 9W	3. LED 12,5W
Flujo Luminoso nominal (lm)	420	450	800
Flujo Luminoso real (lm)	419	443	787
Eficacia (lm/W)	48,05	54,76	63,26
Clasificación	A	A	A
Criterio de conformidad ANSI C78.5.2003	Cumple	Cumple	Cumple

Tabla 9

Eficacia de las bombillas tipo CFL.

	4. CFL 8W	5. CFL 9W	6. CFL 15W
Flujo Luminoso nominal (lm)	375	450	800
Flujo Luminoso real (lm)	337	412	731
Eficacia (lm/W)	47,6	46,98	51,48
Clasificación	A	A	A
Criterio de conformidad ANSI C78.5.2003	No cumple	Cumple	Cumple

Pesos por iluminación

El valor calculado de pesos por iluminación para la muestra en estudio se presenta a continuación. El valor de kilovatio hora fue considerado para el estrato 3 usuarios CONDENSEA, esto debido al mayor poder adquisitivo que presentan los estratos medios (tablas 10 y 11).

Tabla 10

Índice de pesos por iluminación para bombillas tipo LEDs.

LED	Precio [S]	Potencia Nominal [W]	Flujo Nominal [lm]	Vida Nominal [Horas]	Pesos por Iluminación	Precio S/KWh
1. LED 8,5W	40800	8,5	420	24966	10,15	309,21
2. LED 9W	70000	9	450	25185	12,36	309,21
3. LED 12,5W	57500	12,5	800	25000	7,71	309,21

Tabla 11

Índice de pesos por iluminación para bombillas tipo CFLs.

CFL	Precio [S]	Potencia Nominal [W]	Flujo Nominal [lm]	Vida Nominal [Horas]	Pesos por Iluminación	Precio S/KWh
4. CFL 8W	8900	8	375	10000	8,97	309,21
5. CFL 9W	10900	9	450	8000	9,21	309,21
6. CFL 15W	11900	15	800	5913	8,31	309,21

Prestando atención a la fila de pesos por iluminación, es evidente notar que las bombillas tipo LEDs tienen un mayor costo y estarían desfavoreciendo el bolsillo del consumidor, mientras tanto, el valor observado para las CFLs tendrían mayor acogida entre los compradores, propagándose la utilización de esta tecnología, excepto la luminaria (3) LED 12.5 W que presenta un costo de 7,71, siendo la lámpara con menor costo de pesos por iluminación de la muestra debido a su alto flujo luminoso y su prolongada vida útil.

Resultados de Simulación DIALux

Una vez introducidos los documentos fotométricos obtenidos por el goniofotómetro, el simulador permite el diseño de los locales, objetos particulares, la disposición de luminarias y de las áreas de cálculo. Se presenta de forma breve los cálculos realizados por DIALux 4.9.

Habitación. Este es uno de los sitios en los que no sólo se descansa y duerme, sino que también es utilizado para leer, vestirse o maquillarse. Por tales razones, se designó como área de trabajo el sector de la cama, y gran parte de su alrededor, lo que deja el área circundante, para el resto de la habitación (Fig. 6, 7 y 8, y tabla 12).

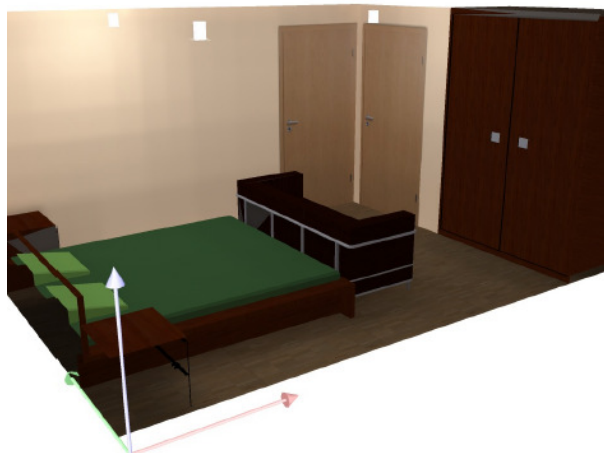


Figura 6. Habitación iluminada.

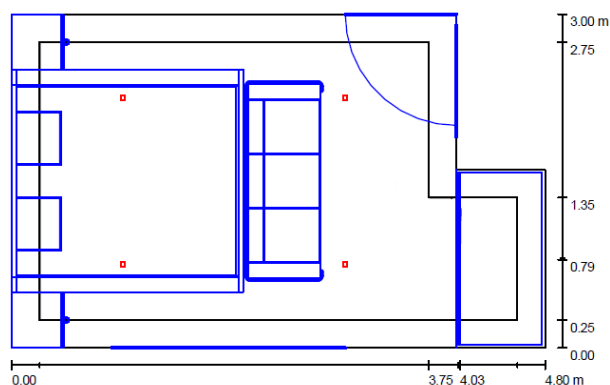


Figura 7. Ubicación de CFLs.

Sala comedor. En la sala, se desarrollan diferentes actividades como leer, conversar, ver televisión, y utilizar juegos de mesa; por tanto, se necesitan diferentes esfuerzos visuales. Se establece entonces el área de trabajo alrededor de la mesa de centro y el área circundante, esto es, el espacio que ocupan los muebles. En esta zona, se emplearon cinco CFLs.

El comedor es otro de los lugares que al igual que la sala se pasa gran tiempo. Es recomendable utilizar una lámpara

Tabla 12

Resultados de simulación en la habitación.

Nivel de iluminación LED					Nivel de iluminación CFL						
Habitación	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]	Habitación	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]
Área de trabajo	133	85	0,642	17	2,4135	Área de trabajo	142	119	0,838	19	3,1236
Área circundante	96	56	0,587			Área circundante	124	94	0,759		
Área total	117	57	0,484			Área total	135	94	0,699		

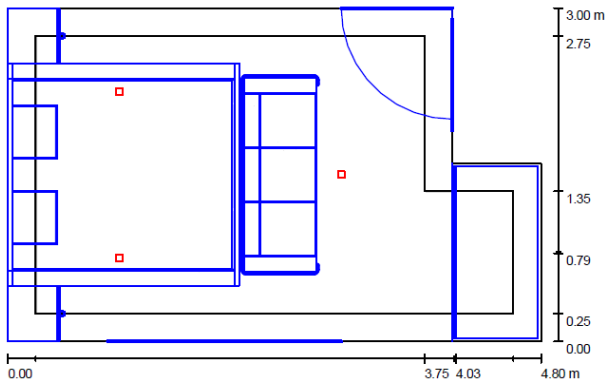


Figura 8. Ubicación de LEDs.

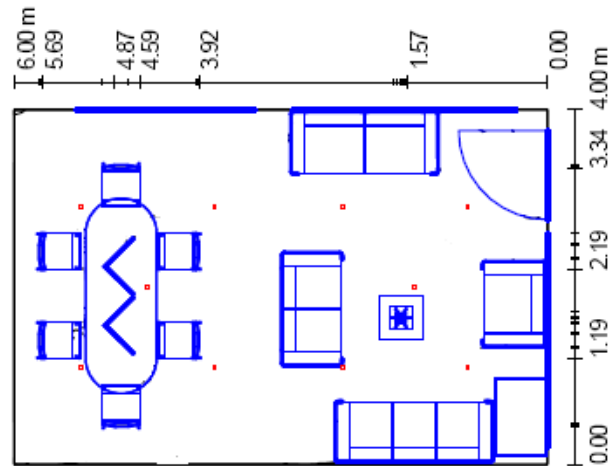


Figura 10. Ubicación de CFLs.

en el centro de la mesa para iluminar los alimentos y no deslumbrar a las personas que allí se encuentran. Este sería entonces el área de trabajo a iluminar, uniformemente, y en el área circundante se designó como toda la zona alrededor de la mesa (Fig. 9, 10 y 11, y tabla 13).



Figura 9. Sala comedor iluminada.

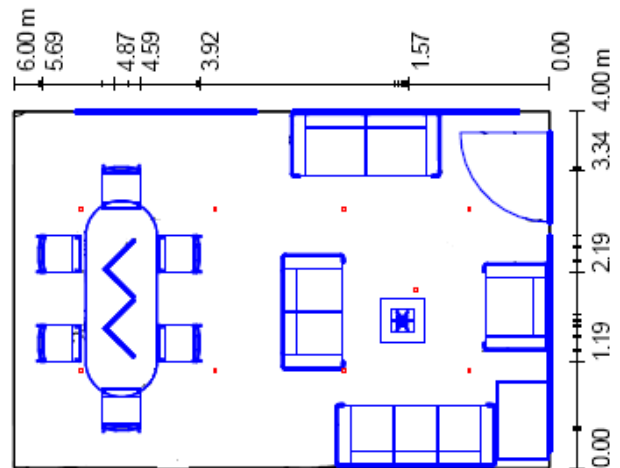


Figura 11. Ubicación de LEDs.

trabajo que comprende el lavaplatos hasta la estufa y el resto, el área circundante.

Cocina, escaleras y pasillo. La cocina, es uno de lugares de mayor uso, ya que se realizan variadas actividades aparte de cocinar, como hacer trabajos caseros y a veces hasta hacer visita. Se necesita un buen nivel de iluminación en la parte de preparación de alimentos, ésta sería la zona de

El pasillo, y escaleras cumplen la función de unir las zonas de la casa, sin que se pase mucho tiempo en ellos, por lo que se necesitaría un nivel de iluminación bajo, sin que dañe la armonía, dejando una uniformidad adecuada para transitar.

Tabla 13

Iluminación en sala comedor.

Nivel de iluminación CFL						Nivel de iluminación LED					
Sala	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]	Sala	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]
Área de trabajo	213	150	0,704	18	3,0225	Área de trabajo	232	184	0,791	17	2,5407
Área circundante	172	130	0,757			Área circundante	181	136	0,749		
Área total	193	130	0,674			Área total	205	137	0,668		
Comedor	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]	Comedor	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]
Área de trabajo	225	176	0,782	17	2,6758	Área de trabajo	204	166	0,813	16	2,5657
Área circundante	211	161	0,766			Área circundante	202	152	0,755		
Área total	218	143	0,657			Área total	203	151	0,743		

El área de trabajo que se definió fue al comenzar a subir las escaleras, proponiendo como área circundante el resto del pasillo (Fig. 12, 13 y 14, y tabla 14).



Figura 12. Cocina, escaleras y pasillo iluminados.

Baño. En el baño se requiere una iluminación uniforme destacando la zona donde se realizan tareas tales, como afeitarse y maquillarse, por lo que se asignó el área de trabajo sobre el lavamanos y el espejo, y el área circundante para el resto del baño con un nivel un poco más bajo que la zona principal (Fig. 15, 16 y 17, y tabla 15).

Análisis de simulación. En todos los casos y lugares, se ubicaron las luminarias para sacar el máximo rendimiento del diagrama de intensidad luminosa de cada tecnología, mostrando una tendencia favorable hacia las LEDs, debido a una mejor distribución que se puede apreciar en los planos

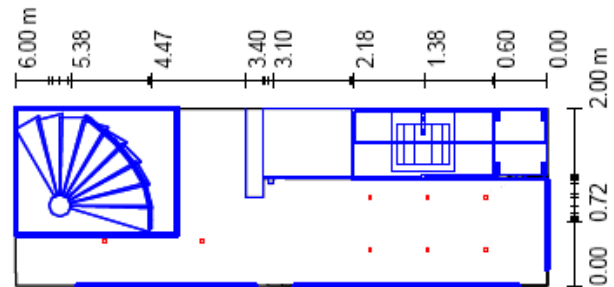


Figura 13. Ubicación de CFLs.

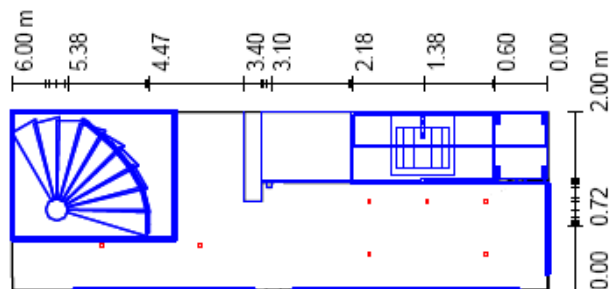


Figura 14. Ubicación de LEDs.

C y γ , con una eficacia del 76 % para las CFLs y del 86 % para bombillas LEDs. Como lo evidencian la Fig. 18 y 19, respectivamente, tomadas por el goniofotómetro y evaluadas por DIALux.

El primer ítem a cumplir, fue el nivel de luminosidad que se requiere, donde se consiguió utilizar un LED menos en comparación con las CFLs, en la mayoría de los espacios, ya que al dejar la misma cantidad que se utilizó con su similar LED, no lograba alcanzar el nivel requerido por la norma, en cuanto a iluminancia y factor de uniformidad necesarios

Tabla 14

Iluminación en cocina, escaleras y pasillo.

Nivel de iluminación CFL						Nivel de iluminación LED					
Cocina	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]	Cocina	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]
Área de trabajo	315	232	0,738	10	3,9894	Área de trabajo	306	217	0.707	10	3,0423
Área circundante	338	213	0,631			Área circundante	334	218	0.651		
Área total	329	213	0,649			Área total	321	216	0,674		
Pasillo y Escalera	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]	Pasillo y Escalera	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]
Área de trabajo	96	57	0.591	10	5,2278	Área de trabajo	139	121	0,875	10	4,1806
Área circundante	112	37	0.328			Área circundante	119	39	0,329		
Área total	103	33	0,324			Área total	115	35	0,305		

Tabla 15

Iluminación en baño.

Nivel de iluminación CFL						Nivel de iluminación LED					
Baño	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]	Baño	Em [lx]	Emin [lx]	Em/Emin	UGR	VEEI [W/m2 /100lux]
Área de trabajo	155	138	0,893	11	6,6905	Área de trabajo	127	108	0,847	10	4,7717
Área circundante	120	63	0,528			Área circundante	101	55	0,542		
Área total	133	68	0,51			Área total	111	59	0,529		



Figura 15. Baño iluminado.

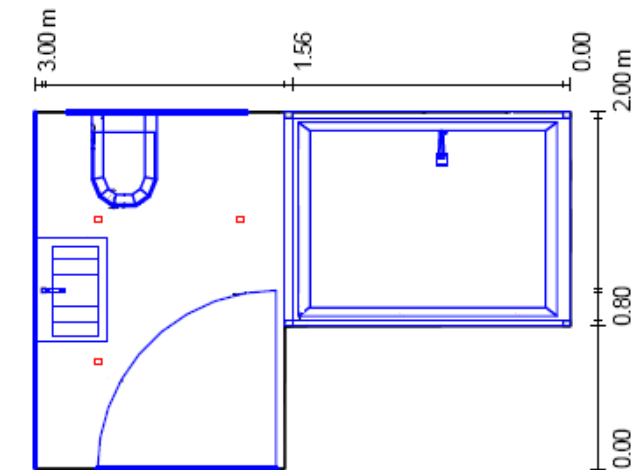


Figura 16. Ubicación de CFLs.

para las áreas de trabajo y circundantes, lo que favoreció el factor del VEEI de la Iluminación de Estado Sólido. Para garantizar que el sistema de iluminación no decaiga se debe

limpiar cada seis meses, evitando así que al cubrirse de polvo y grasa no emitan la misma cantidad de luz al ambiente. En el caso de la cocina, es conveniente limpiar las bombillas con una mayor frecuencia.

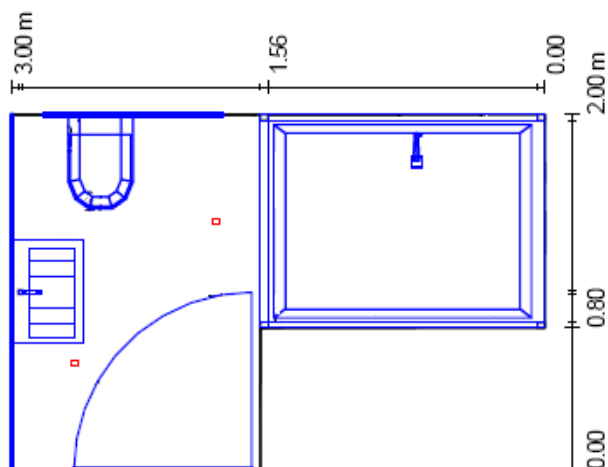


Figura 17. Ubicación de LEDs.

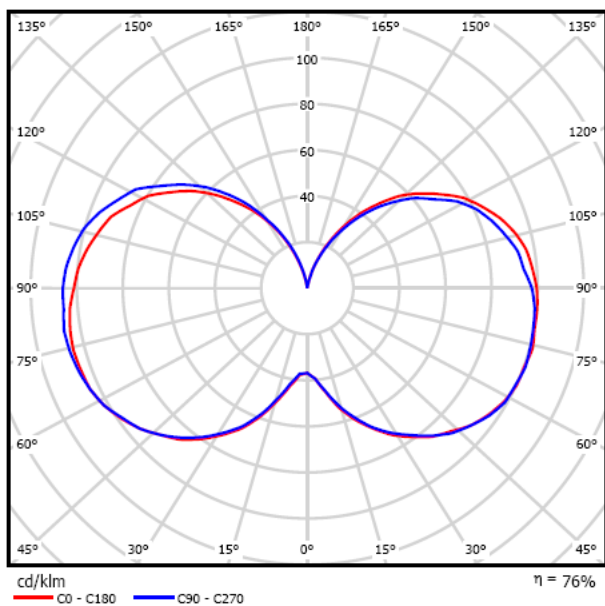


Figura 18. Diagrama de intensidad luminosa CFL 15 W.

En casos particulares, como el pasillo y las escaleras, debido a la geometría de los espacios, se dejó a criterio de diseño la iluminación requerida, ya que no se pueden calcular completamente las áreas a evaluar, por que se encuentran debajo de la escalera y no arrojan el resultado esperado, pero se tuvo en cuenta que la iluminación promedio no decayera por debajo de lo regulado. En los casos en que se utilizó un número igual de lámparas de cada tecnología, se debió al diseño de los locales que no permitieron un mejor desempeño de la luminaria empleada, lo que afectó los resultados, viéndose traducido en el aumento de lámparas para cubrir el nivel de iluminación demandado.

Por último, los niveles de UGR en ninguno de los dos sistemas de iluminación superó el máximo permitido por las normas.

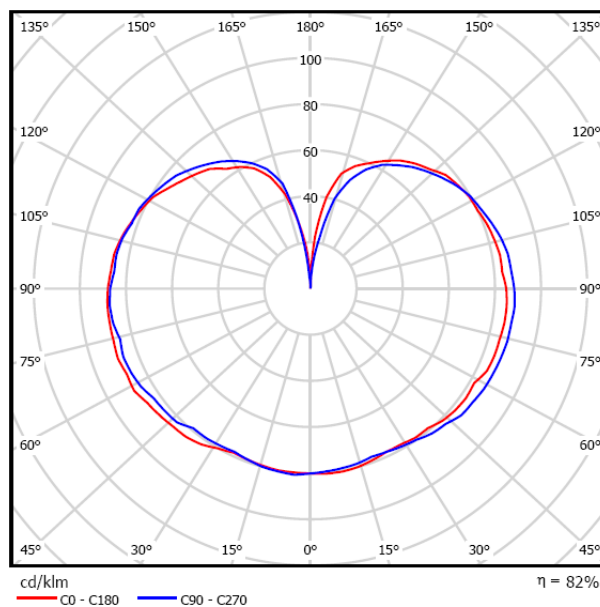


Figura 19. Diagrama de intensidad luminosa LED 12.5 W.

Conclusiones

El Gobierno Nacional ha promovido iniciativas a través del Ministerio de Minas y Energía, y ha establecido medidas para promover el uso racional de la energía, mediante el Decreto 3450 del 2008, en donde ordena que se remplacen las lámparas ineficientes por fuentes de mayor eficacia lumínica. Iniciativas como estas deben también exigir estándares de calidad a los fabricantes a través de regulaciones con el propósito de defender los intereses de los consumidores y empresas generadoras de energía.

La conexión de CFLs en paralelo arrojó como resultado principal un mejoramiento en el Factor de Potencia y en el THD-I en comparación de su comportamiento individual, ya que en la sumatoria de componentes armónicas de cada una de las lámparas existe una compensación, debido a la existencia de armónicos tanto negativos como positivos, que arroja como resultado una cancelación de magnitud.

Los valores de THD-I, para las lámparas de iluminación de estado sólido son significativamente bajos, respecto a los obtenidos para las CFLs debido a que no necesitan una elevada frecuencia de operación, como lo hacen las CFLs para alcanzar la excitación en las partículas de mercurio y brindar los niveles de iluminación adecuados. Además, los componentes electrónicos que poseen ambas tecnologías hacen que caractericen el Factor de Potencia de cada una, comportándose las CFLs como una carga capacitiva y las luminarias de estado sólido tendiendo a ser una carga resistiva, cuando es de baja potencia, y mostrando un comportamiento levemente capacitivo, cuando la luminaria es de mayor potencia.

Las luminarias tipo LED emitieron un mayor flujo luminoso respecto a las CFLs, la razón probablemente sea su forma física y su composición química, para emitir fotones, hecho que quedaría por comprobar, ya que no fue objetivo del estudio. Estas y otras inquietudes pudieran desembocarse en un nuevo proyecto enfocado a este tipo de iluminación.

El análisis del eficiente comportamiento fotométrico de la lámpara LED escogida, se basó en una mejor dispersión de la iluminancia e intensidad luminosa, a una menor potencia que su similar fluorescente. La eficacia lumínica del LED es mayor, lo cual significa ahorrar energía con el mismo nivel de iluminación, hecho que se evidenció en los diferentes espacios de la casa en donde se utilizó hasta una bombilla LED menos que en el sistema de CFLs.

Una de las desventajas de los LEDs es el precio de instalación del sistema de iluminación, ya que es bastante alto debido a que cuesta hasta cinco veces más que colocar CFLs, aunque la inversión se recupera durante su vida útil.

El ahorro con Iluminación de Estado Sólido se duplicaría gradualmente si el precio por el kilovatio hora aumenta, recuperando la inversión inicial y reduciendo los gastos a futuro en el mantenimiento del sistema de alumbrado. Adicionalmente, utilizando reguladores de ajuste de tensión (llamados *dimmers*) y foto celdas de encendido automático, se optimizaría aún más el rendimiento del LED, con lo que se ajustaría el nivel de iluminación, consumiendo menos energía y mejorando el confort en las instalaciones.

Referencias

- ANSI. (2003). *ANSI c78.5-2003 american national standard for electric lamps. specification for performance of self-ballasted compact fluorescent lamps*. E-book.
- Brugnoni, M., y Iribarne, R. (2006). *Estudio de impactos en redes de distribución (i) y medio ambiente (ii) debidos al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas*. (Subsecretaría de Energía Eléctrica, Dirección Nacional de Promoción, Programa de Calidad de Artefactos Energéticos PROCAE)
- Castañeda, D., y Sáenz, G. (2012). *Estudio comparativo de características eléctricas y fotométricas de leds de iluminación de estado sólido y cfls para iluminación interior*. (Trabajo de Grado Tecnología en Electricidad Universidad Francisco José de Caldas)
- DOE. (2011). *Basics standards*. Descargado de http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/sslbasics_standards.html
- ENERGY STAR. (2011). *How a product earns the ENERGY STAR label*. Descargado de www.energystar.gov/index.cfm?c=products.pr_how_earn
- ENERGY.GOV. (2011). *Commercially available LED product evaluation and reporting CALiPER*. Descargado de www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/caliper_faq.html
- ICONTEC. (1997). *NTC 4359 electrotecnia. bombillas fluorescentes compactas. método de ensayo para determinar las características fotoeléctricas*. E-book.
- ICONTEC. (2002a). *NTC 5100 etiqueta genérica informativa de desempeño energético*. E-book.
- ICONTEC. (2002b). *NTC 5101 eficacia energética. bombillas fluorescentes compactas. rangos de desempeño energético y etiquetado*. E-book.
- IESNA. (2000). *IESNA LM-66-2000 approved method the electrical and photometric measurements*. Impreso.
- IESNA. (2007). *IESNA LM-79 approved method: Electrical and photometric measurements of solid-state lighting products*. Impreso.
- IESNA. (2008). *IESNA LM-80 approved method: Measuring lumen maintenance of led light sources*. Impreso.
- ISO. (2002). *ISO 8995 iluminación de puestos de trabajo en interiores*. E-book.
- MinMinas. (2010). *RETILAP reglamento técnico de iluminación y alumbrado público*. On line.
- UPME, y UNAL. (2008). *Caracterización de las bombillas para su uso interior comercializadas en colombia*. impreso.