



Análisis de distorsión armónica en iluminación LED

Analysis of Harmonic Distortion in LED Lighting

Andrés Felipe Barbosa Franco¹ Luis Antonio Noguera Vega² William Mauricio Giral Ramírez³

Para citar este artículo: A. F. Barbosa, L. A. Noguera y W. M. Giral, "Análisis de distorsión armónica en iluminación LED". *Revista Vínculos*, vol 14, no 2, julio-diciembre 2017, 95-107. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.12520>.

Recibido: 20-04-2017 / **Aprobado:** 30-04-2017

Resumen

Objetivo: realizar una revisión bibliográfica acerca del comportamiento de los armónicos a causa de la iluminación LED.

Método: plantear una investigación a fondo en índices bibliográficos (IB) y bases bibliográficas con comité de selección (BBCS) acerca de los armónicos en iluminación LED.

El siguiente artículo presenta el comportamiento eléctrico de la iluminación LED enfocado en la distorsión armónica, analizando temas como: generación de armónicos, normas aplicadas a los armónicos, solución de los armónicos, entre otros. Cada tema mencionado viene acompañado de su respectiva citación para garantizar los derechos de autor y brindar al lector un movimiento dinámico entre lo consignado en este trabajo y los trabajos citados.

Resultados: se realizó una investigación a fondo de forma minuciosa, enfocándose en los armónicos en iluminación LED, analizando su estado actual y consecuencias con respecto a las otras luminarias convencionales y el sistema energético.

Palabras clave: controladores, dimerizable, distorsión armónica, iluminación LED.

Abstract

Objective: perform a literature review on the behavior of harmonics a cause of LED lighting.

Method: raise an in-depth research on Bibliographic Indexes (IB) and Bibliographic Bases with Selection Committee (BBCS) on Harmonics in LED lighting.

The following article presents the electric behavior of LED illumination focused on harmonic distortion, analyzing topics such as harmonic generation, harmonics standards, harmonic solving, among others; each topic mentioned is accompanied by its respective citation to guarantee the copyright and give the reader a dynamic movement between what is stated in this work and the works cited.

Results: a thorough investigation was carried out in detail, focusing on the harmonics in LED lighting, analyzing its current state and consequences with respect to other conventional luminaires and the energy system.

Keywords: driver, dimmable, harmonic distortion, LED lighting.

1. Tecnólogo en Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Proeléctricos, Colombia. Electrónico: afbarbosaf@correo.udistrital.edu.co
2. Ingeniero en Distribución y Redes Eléctricas; especialista en Automatización Industrial; estudiante de maestría en Ingeniería Eléctrica. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Electrónico: lanoguera@correo.udistrital.edu.co
3. Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación; especialista en Bioingeniería; candidato a maestría en Ingeniería Electrónica. Universidad Santo Tomás. Colombia. Electrónico: williamgiral@usantotomas.edu.co

1. Introducción

La iluminación eléctrica ha tenido muchos avances desde que Thomas Alva Edison patentara la bombilla incandescente en 1879 en los Estados Unidos, la tecnología ha avanzado en el transcurso del tiempo acompañada de nuevas fuentes de iluminación, algunas de ellas fueron llamadas bombillas fluorescentes compactas (CFL), bombillas de haluros metálicos, bombillas de sodio de alta presión, bombillas LED (por sus siglas en inglés, light-emitting diode), entre otras, representando beneficios sobre la bombilla incandescente [1]. Desde el invento de la primera bombilla, la cual tenía en promedio dieciséis lúmenes por vatio [2], surgió una nueva tecnología como la LED, que es una bombilla conformada de dispositivos electrónicos o semiconductores de una combinación de materiales elementales como nitruro de indio y galio (InGaN), allí se genera la luz. Los LED pueden ser sintonizados a longitudes de ondas específicas según las necesidades del usuario [1].

Tabla 1. Evolución de la iluminación y su eficiencia [3-5].

| Tecnología | Año de invención | Vida útil [Horas] | Eficiencia [Lm/W] |
|---------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Incandescente | 1878 | 1000 | 15 |
| Fluorescente | 1930 | 8000 | 107 |
| Halógena | 1959 | 2000 | 24 |
| CFL | 1970 | 10000 | 63 |
| LED | 1990 | 100000 | 303 |

De la Tabla 1 se evidencia que la iluminación LED tiene la mayor eficiencia y aún sigue aumentando, de ahí que su implementación en los diferentes sectores sea a gran escala y esté dominando el mercado [6]. La iluminación LED utiliza un tipo de conversión de energía alterna a energía continua por medio de un rectificador de onda completa [7]; por lo tanto, utilizan *driver* o convertidores que están compuestos por un circuito rectificador, un condensador de filtro, un convertidor DC-DC y un controlador de corriente constante [8]. Existe un desequilibrio de potencia entre la entrada y la salida del *driver*, la potencia de

entrada monofásica pulsa al doble de la frecuencia de línea, mientras que la potencia de salida es casi constante [9]; por tal razón, se generan ruidos (pasivos o activos) en el sistema de energía [10].

Las cargas no lineales como inversores, rectificadores e iluminación LED distorsionan la forma de onda de la corriente, lo que provoca caídas de tensión no sinusoidales, favoreciendo así la aparición de distorsión armónica [11]. Los armónicos se definen como los voltajes sinusoidales o corrientes que tengan frecuencias con múltiplos enteros de la frecuencia del sistema de suministro diseñado para funcionar. La desviación de la forma de onda de la senoide perfecta es generalmente expresada en términos de distorsión armónica de la corriente y tensión [12]. La distorsión armónica afecta el rendimiento de los transformadores de distribución, porque el núcleo de hierro está más saturado [13], además de aumentar las pérdidas en bobinados por efecto Joule [14], el aumento de los armónicos causan interferencias en señales de comunicaciones, sobretensiones, sobrecalentamiento de equipos, sobrecarga en los conductores, calefacciones en diferentes componentes del sistema [15], [16]. Esta situación ha llevado a que todos los gobiernos y las instituciones científicas desarrollen una solución y, por ello, se han establecido normas que regulan las magnitudes máximas permitidas en distorsión armónica [17].

Por tal razón, este artículo pretende hacer una descripción del comportamiento de los armónicos generados por la tecnología LED; para ello, se divide el artículo en cuatro secciones, encontrando en la primera sección la introducción, en la segunda sección una descripción de las normas que tienen mayor relevancia en el tema de distorsión armónica, en la tercera sección un análisis de distorsión armónica en iluminación LED, comparando fuentes de iluminación LED fija y dimerizable, en las que se puede evidenciar sus considerables diferencias y su contenido armónico con una muestra de algunos controladores que cumplen la norma IEC y los que están incumpléndola, por último, en la cuarta sección del artículo se presentan las conclusiones que reúnen lo más relevante de la revisión bibliográfica.

2. Normas aplicadas a la distorsión armónica

En el contexto de la distorsión armónica, es evidente que no existe un solo estándar de uso mundial, esto por las diferencias que existen en la reglamentación de muchos países. Para este caso, se tratará la norma IEEE-519 y la IEC-61000-3-2, siendo la primera la que define los conceptos de armónico y THD, mientras la IEC trata con mayor profundidad los límites del THD en sistemas de iluminación [18].

2.1 IEEE Standard 519-2014

Para el control armónico en sistemas de energía eléctrica, la norma define lo siguiente:

- Armónico (componente): componente de orden superior a una de las series de Fourier de una cantidad periódica; por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, el orden armónico tres, también conocido como el tercer armónico, es 180 Hz.
- Distorsión armónica total (THD): la relación entre el cuadrado medio de la raíz del contenido armónico, considerando los componentes armónicos hasta el 50a orden y específicamente excluyendo la interarmónica, expresada como un porcentaje del fundamental [19]. Los

componentes armónicos de orden superior a 50a pueden ser incluidos cuando sea necesario.

Al evaluar los niveles de armónicos para la comparación con los límites recomendados en este documento, cualquier instrumento utilizado debe cumplir con las especificaciones de IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30 [20], debido a que la gestión de armónicos en un sistema de energía se considera una responsabilidad conjunta que involucra tanto a los usuarios finales como a los propietarios u operadores del sistema; se recomiendan límites armónicos tanto para tensión como para corriente. En el caso la limitación de las corrientes armónicas no resulte en niveles aceptables, los propietarios u operadores del sistema deberán tomar medidas para modificar las características del sistema [21].

2.2 IEC standard 61000-3-2

El objetivo de esta norma es establecer límites para la generación de armónicos de equipos dentro de su ámbito de aplicación, de modo que, el cumplimiento de los límites debe ser garantizados, asegurando que los niveles de perturbación armónica no excedan los niveles de compatibilidad definidos en la IEC standard 61000-2-2. Para limitar la emisión de componentes armónicos la IEC standard 61000-3-2, dicta una clasificación de equipos tal como se incluye en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de equipos.

| CLASE A | CLASE B | CLASE C | CLASE D |
|--|---|-------------------------|--|
| Equipos trifásicos equilibrados. Aparatos electrodomésticos, excluidos los equipos identificados como de clase D. herramientas, excepto herramientas portátiles. atenuadores para lámparas incandescentes. equipo de sonido. | herramientas portátiles. equipos de soldadura de arco que no es un equipo profesional. | equipos de iluminación. | ordenadores personales y monitores de computadoras personales. receptores de televisión. refrigeradores y congeladores que tienen uno o más accionamientos de velocidad variable para controlar el (los) motor (es) del compresor. |

Fuente: elaboración propia.

La IEC standard 61000-3-2 especifica los límites permitidos de corrientes armónicas inyectadas en el sistema de suministro público por parte de aparatos eléctricos y electrónicos que tienen un consumo menor o igual a 16 A por fase en un sistema de baja tensión [22], [23].

2.2.1 Potencia de entrada activa >25W

Para los equipos de iluminación que tengan una potencia de entrada activa superior a 25 W, las corrientes armónicas no deberán exceder los límites relativos dados en la Tabla 3.

Para equipos de iluminación de descarga con atenuadores incorporados, que se componen de *dimers* o atenuadores independientes construidos en un recinto, se aplicará la siguiente condición: los valores de corriente armónica para la condición de carga máxima derivada de los límites porcentuales indicados en la Tabla 3, en cualquier posición de regulación, no deberán exceder el valor de corriente permitido en la condición de carga máxima [24].

Tabla 3. Condiciones armónicas establecidas por la norma [25].

| λ de armónicos | Corriente armónica máxima admisible expresada como porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental [%] |
|---------------------------|--|
| 2 | 2 |
| 3 | $(30*\lambda)^{\wedge}a$ |
| 5 | 10 |
| 7 | 7 |
| 9 | 5 |
| $11 \leq \lambda \leq 39$ | 3 |

λ Es el factor de potencia del circuito

2.2.2 Potencia de entrada activa $\leq 25 W$

Los equipos de iluminación de descarga con una potencia de entrada activa inferior o igual a 25 W cumplirán con uno de los dos conjuntos de requisitos siguientes: las corrientes armónicas no excederán los límites de potencia de la columna dos de la Tabla 4, no hace referencia directamente sobre

iluminación LED. La corriente del tercer armónico, expresada como porcentaje de la corriente fundamental, no excederá el 86% y la corriente del quinto armónico no excederá del 61% [26]; además, la forma de onda de corriente de entrada debe ser tal que alcance el umbral de corriente de 5% antes o a 60°, tenga su valor máximo antes o a 65° y no caiga por debajo del umbral de corriente del 5% antes de 90°, cualquier cruce a cero de la tensión de alimentación fundamental [27]. Si el equipo de iluminación se descarga tiene un dispositivo de regulación incorporado, la medición se realiza únicamente en condiciones de plena carga.

Tabla 4. Condiciones armónicas establecidas por la norma [25].

| λ de armónicos | Corriente armónica máxima permisible por vatio [mA/W] | Corriente armónica máxima permisible [A] |
|---------------------------|---|--|
| 3 | 3,4 | 2,3 |
| 5 | 1,9 | 1,14 |
| 7 | 1 | 0,77 |
| 9 | 0,5 | 0,4 |
| 11 | 0,35 | 0,33 |
| $13 \leq \lambda \leq 39$ | $3,85/\lambda$ | Ir a la Tabla 3 |

3. Análisis de distorsión armónica en iluminación LED

Los artículos consultados sobre la distorsión armónica en iluminación LED, realizaron las mediciones necesarias para evidenciar los armónicos generados [28] expresados en porcentaje; escogen diferentes luminarias LED de ensayo, cada una con su respectiva potencia, la mayoría se fundamentan en iluminación LED fija y otros en iluminación LED dimerizable. Como referencia en la norma IEC para la distorsión armónica, se selecciona como objeto de estudio y profundización el tercer armónico y el THD de la iluminación LED, ya que estos pueden indicar la mayor afectación a la red. Uno de los factores importantes analizados radican en el cumplimiento de las normas aplicadas y el análisis del controlador que acompaña a cada luminaria LED [29].

3.1 Distorsión armónica en LED fija

De la distorsión armónica en fuentes de iluminación LED fija, se han realizado numerosos estudios en los cuales se evidencian que han utilizado marcas reconocidas y en otros solo especifican la fuente de iluminación con su potencia sin indicar a qué marca corresponde, generando incertidumbres porque muchas marcas cumplen con algún estándar y estas permitirían una mejor comparación. En la Tabla 5 se hace una recopilación de ensayos realizados a luminarias LED fija menores a 30 w, utilizando un controlador que propiamente no reduce significativamente los armónicos.

Tabla 5. Distorsión armónica del LED sin ninguna solución de armónicos.

| Luminarias de ensayo | Armónicos [%] | | Referencias |
|----------------------|-----------------|--------|-------------|
| | Tercer armónico | THD | |
| Osram [4W] | 89,24 | 173,9 | [12] |
| Osram [6W] | 91,96 | 174,3 | |
| Evenzo [3W] | 90,7 | 164,35 | |
| Bright [5W] | 86,65 | 167,2 | |
| Cash [7W] | 91,23 | 168,2 | |
| Osram [4W] | 91,4 | 174,1 | |
| LED S7 [11,9W] | 96 | 182 | [15] |
| LED S8 [12W] | 96 | 184 | |
| LED S9 [11,9W] | 89 | 132 | |
| LED [30W] | 91 | 146,1 | [4] |
| LED B5 | N/A | 101,1 | [31] |

Fuente: elaboración propia.

Se puede ver en la distorsión armónica de la Tabla 5 que el tercer armónico representa más del 80 % de la distorsión y un THD mayor al 150%, siendo un nivel alto de distorsión armónico debido a que en estos estudios las luminarias de ensayo no contenían controladores con filtros que cumplieran la norma respecto a la distorsión armónica. Esta situación es muy recurrente en países en los que no existe un control sobre el uso de estos controladores, los cuales son más económicos por lo que su uso es significativo.

En la Tabla 6 se visualizan investigaciones de la distorsión armónica en diferentes marcas de luminarias LED, estas contienen controladores con filtros para la reducción de los armónicos.

Tabla 6. Distorsión armónica en iluminación LED con un controlador que posee filtro para la reducción de distorsión armónica.

| Luminarias de ensayo | Armónicos [%] Tercer armónico | THD | Referencias |
|---------------------------|----------------------------------|--------|-------------|
| LED A [4,4W] | 72 | 141,4 | [32] |
| LED B [5,5W] | 22 | 75,6 | |
| LED C [8,9W] | 8 | 56 | |
| Philips [4W] | 34,61 | 63,05 | [12] |
| Philips [5W] | 36,92 | 63,83 | |
| Philips [7W] | 32,34 | 64,23 | |
| Osram [8W] | 22,25 | 30,94 | |
| Osram [10W] | 32,12 | 34,78 | |
| Toshiba [5.5 W] | 73,4 | 106,3 | |
| Osram [4,5 W] | 91,72 | 157,76 | [30] |
| Philips [5W] | 35,3 | 64,1 | |
| LED S10 [10,2 W] | 18 | 29 | |
| LED S11 [9,9W] | 19 | 22,67 | [15] |
| LED S12 [16,5 W] | 4 | 22,65 | |
| LED S13 [11,6W] | 16 | 15,8 | |
| LED S14 [11,6W] | 14 | 13,7 | |
| LED [30W] | 52,2 | 59 | [4] |
| LED [150W] | 46,15 | 67,11 | [33] |
| LED [10W] fabricante G | 85 | N/A | [34] |
| LED [9W] fabricante H | 36 | N/A | |
| LD [18W] fabricante A | 7 | N/A | |
| LED brand A | 72 | 141,1 | [34] |
| LED brand B | 20 | 75,6 | |
| LED brand C | 7 | 56 | |
| LED [60W] | 87,6 | 167,2 | [35] |
| LED A4 | N/A | 55,2 | [31] |
| LED C6 | N/A | 12,2 | |

Fuente: elaboración propia.

Es evidente que el uso de controladores con filtros para la reducción de la distorsión armónica es mucho más eficiente, obteniendo un tercer armónico que en promedio es inferior al 50%; respecto al THD, el promedio de los estudios citados se encuentra cercano al 60%. Los que superan más del 100% son luminarias LED donde el filtro no realiza su correcta reducción armónica, por tanto, deben analizar otro tipo de circuito que contenga un filtro mejor, ya sea activo o pasivo o de mejor eficiencia [36].

La iluminación LED que contiene un controlador con filtros que reducen la distorsión armónica, cumple con la función de no contaminar la red eléctrica con magnitudes que no permite la norma IEC. Estos controladores se diferencian a la hora de reducción armónica, siendo su principio el uso de diferentes filtros; es evidente que los resultados obtenidos indican que unos son más eficientes que otros, de ahí su importancia en el control y seguimiento respecto a los valores permitidos por la normatividad.

3.2 Distorsión armónica en LED dimerizable

Otro aspecto en el análisis de la distorsión armónica producida por la iluminación LED se fundamenta en la tecnología que tiene características dimerizables, la cual consiste en la regulación o atenuación del flujo luminoso [37]. A diferencia de los estudios realizados en condiciones fijas de iluminación, para este caso los ensayos se realizaron con diferentes luminarias LED y en diferentes ángulos de flujo luminoso, referenciando a 0° como el mínimo flujo luminoso y ascendiendo hasta los 135° como el máximo flujo luminoso.

La Tabla 7 presenta los resultados que la iluminación LED dimerizable de mayor trascendencia, en estos se pueden encontrar controladores que funcionan realizando la atenuación en la señal alterna, como es el caso de los de tipo TRIAC y los que hacen la atenuación en la señal continua, utilizando el PWM, aunque no todos los artículos consultados indican qué tecnología tenía el

controlador. Los rangos de estudio van desde un ángulo cero, cuando el flujo luminoso es mínimo, hasta un flujo luminoso de 135°, en los que se evidencia que con controladores PWM el tercer armónico no supera el 20%, mientras en los de tipo TRIAC son los que mayores valores presentan. En cuanto al THD la tendencia es igual, obteniendo en un estudio porcentaje de 390% con controlador tipo TRIAC.

Tabla 7. Distorsión armónica en iluminación LED dimerizable.

| Luminarias de ensayo | Armónicos [%] | | Referencias |
|----------------------------|---------------|-------|-------------|
| | 3th armónico | THD | |
| Osram [10W] 0° | 55 | N/A | [38] |
| Osram [10W] 45° | 55 | N/A | |
| Osram [10W] 90° | 88 | N/A | |
| Osram [10W] 135° | 95 | N/A | |
| Philips [3W] 0° | 46,7 | 91,1 | |
| Philips [3W] 45° | 64 | 208,7 | |
| Philips [3W] 90° | 83,8 | 348,8 | |
| Philips [3W] 135° | 72,1 | 371,7 | |
| Aira [3W] 0° | 51,4 | 62,8 | |
| Aira [3W] 45° | 36,6 | 47,7 | |
| Aira [3W] 90° | 32 | 53,5 | |
| Aira [3W] 135° | 82,7 | 101,7 | |
| Lámpara A 0° | 20 | 82 | [13] |
| Lámpara A 45° | 23 | 122 | |
| Lámpara A 90° | 12 | 235 | |
| Lámpara B 0° | 8,5 | 30 | |
| Lámpara B 45° | 14 | 90 | |
| Lámpara B 90° | 10,8 | 220 | |
| LED de prueba – TRIAC min. | 81,1 | 284,2 | [23] |
| LED de prueba – TRIAC max. | 79,2 | 390,9 | |
| LED de prueba – PWM min. | 7,3 | 7,7 | |
| LED de prueba – PWM max. | 8,4 | 13,8 | |

Fuente: elaboración propia.

Es importante que el uso de la iluminación LED dimerizable sea realizada con controladores de tipo PWM, ya que son los que mejor presentan rendimiento y reducción del THD; asimismo, el uso de los controladores de tipo TRIAC causan una mayor perturbación.

Tabla 8. Distorsión armónica con más de una luminaria LED.

| Tipos de luminarias | cantidad | Armónicos [%] | | Referencias |
|-----------------------------|----------|---------------|-------|-------------|
| | | 3th armónico | THD | |
| LED A [4,4W] | 9 | 88 | 174,6 | [32] |
| LED B [5,5W] | 9 | 47 | 76,3 | |
| LED C [8,9W] | 9 | 17 | 23,5 | |
| Philips [5W] | 2 | 35,7 | 64,5 | [30] |
| Philips [5W] | 3 | 35 | 62,3 | |
| Osram [4W] | 2 | 92,1 | 174,6 | |
| Osram [4W] | 3 | 89,1 | 173,2 | |
| LED [18W] fabricante I | 3 | 19 | N/A | [34] |
| LED [9W] fabricante A | 2 | 8,5 | N/A | |
| LED [18,5 W] TRIAC | 3 | 73,2 | N/A | [23] |
| LED [18,5] W PWM | 3 | 17 | 22,97 | |
| Combinación LED A4 Y B5 | 2 | N/A | 51,9 | [31] |
| Combinación LED A4 Y C6 | 2 | N/A | 17,9 | |
| Combinación LED B5 Y C6 | 2 | N/A | 40,1 | |
| Combinación LED A4, B5 Y C6 | 3 | N/A | 30,5 | |

Fuente: elaboración propia.

3.3 Comportamiento de la distorsión armónica con más de una luminaria LED

Otra situación que se evidenció en los artículos de consulta radica en el comportamiento de la distorsión armónica con varias luminarias LED en paralelo. En la Tabla 8 se visualiza que hay una elevación mínima de distorsión armónica, pero no

hay fundamentos claros para definir qué tipo de controlador se utilizó, se puede observar, además, que la mayoría no cumple con la norma IEC.

3.4 Comparación de LED versus CFL

Aunque las CFL en algunos países se encuentran prohibidas, aún existe mucho mercado para esta tecnología y también son fuente de contaminación armónica.

La Tabla 9 condensa información importante sobre el comportamiento armónico de luminarias incandescentes, de inducción, CFL y LED, además de algunas combinaciones de ellas. Las luminarias incandescentes son una carga resistiva, por lo tanto el comportamiento de la corriente es puramente sinusoidal; si se cambian varias cantidades de luminarias incandescentes por CFL, la potencia activa se reduciría significativamente, pero la distorsión armónica aparece también de manera significativa afectando a la red eléctrica [46]. Cuando se tiene diferentes marcas de CFL y se aumenta la carga con estas luminarias, también aumenta la distorsión armónica, de forma que estos tipos de iluminación necesitan filtros que regulen o disminuyan la distorsión armónica para cumplir con las normas establecidas [47].

3.5 Tecnologías para reducción de la distorsión armónica en iluminación LED

Ya que la luminaria LED es dos veces más eficiente que la CFL y diez veces más eficiente que la incandescente [41], las industrias deben fortalecer sus tipos de convertidores o filtros con el fin de que la eficiencia energética sea más conveniente para el sistema energético y no produzca efectos nocivos a los componentes de las redes eléctricas; asimismo, es importante el cumplimiento de la norma IEC con el fin de cuidar la red eléctrica y no tener complicaciones futuras. En la Tabla 10 se presentan artículos en los que han trabajado con controladores que combinan filtros y sus resultados en la reducción del THD fue considerable [48].

Tabla 9. Distorsión armónica de diferentes luminarias en diferentes combinaciones.

| Luminarias LED | Luminarias CFL | Armónicos [%] | | | | Referencia | Observaciones |
|-----------------------------|------------------------|---------------|------|------|-------|------------|--------------------------------------|
| | | 3th | 5th | 7th | THD | | |
| N/A | ELSM51B [20w] | 70 | 45 | 42 | | [39] | Tres luminarias en conexión paralela |
| Philips 7 [w] L1 | N/A | 21 | 16 | 4 | 24,64 | | Una luminaria con balasto |
| Osram 6,5 [w] L2 | N/A | 22 | 17 | 4 | 25,67 | | Con balasto |
| Osram 5 [w] L3 | N/A | 23 | 16,5 | 5 | 26,36 | | Con balasto |
| L1+L2+L3 | N/A | 12 | 10 | 2 | 15,81 | | Con balasto |
| N/A | CFL3 10 [w] | 78 | 46 | 33 | 102,2 | [40] | N/A |
| Led 3,3 [w] | N/A | 5 | 5 | 4 | 9,3 | | N/A |
| N/A | CFL 20 [w] | N/A | N/A | N/A | 96,9 | [16] | N/A |
| LED 90 [w] | N/A | N/A | N/A | N/A | 8,5 | | N/A |
| N/A | CFL 8,1 [w] | 72,7 | 44,3 | 22,5 | 97,9 | [8] | N/A |
| LED 4,1 [w] | N/A | 50,3 | 21 | 14,8 | 62,7 | | N/A |
| N/A | CFL 8 [w] | 19 | 2,4 | 7,2 | 20,6 | [41] | N/A |
| N/A | CFL 15 [w] | 15,7 | 4,2 | 16,7 | 27 | | N/A |
| LED 8 [w] | N/A | 63,6 | 16,8 | 28,5 | 71,9 | | N/A |
| LED 15 [w] | N/A | 73,7 | 43,2 | 32,1 | 91,3 | | N/A |
| N/A | EDAPT 23 [w] | 87,7 | 66,2 | 44,9 | 130,8 | [42] | N/A |
| N/A | PHC 15 [w] | 77,4 | 44,9 | 26 | 99,7 | | N/A |
| N/A | PHC 14 [w] | 76,9 | 44,3 | 25,8 | 100,7 | | N/A |
| N/A | PHC 8 [w] | 83 | 54,6 | 32,9 | 114 | | N/A |
| N/A | PHC8+PHC14 | 74,1 | 43,6 | 24,4 | 94,2 | | Combinaciones de luminarias |
| N/A | PHC8+PHC14+EDAPT | 78,8 | 50,1 | 27,2 | 99,8 | | |
| N/A | PHC8+PHC14+PHC15 | 74,8 | 43,6 | 25,6 | 96,4 | | |
| N/A | PHC8+PHC14+PHC15+EDAPT | 77,2 | 46,4 | 23,9 | 96,5 | | |
| PHL 4 [w] | PHC8 | 50 | 23,4 | 18,4 | 66 | | |
| PHL4+ PHL 8 [w] | PHC8 | 36,3 | 13,3 | 12,6 | 44 | | |
| PHL4+PHL8+PHL9,5 9,5 [w] | PHC8 | 31,7 | 8,6 | 6 | 36,2 | | |
| PHL4+PHL8 | PHC8+PH14C | 51,1 | 24,8 | 16,6 | 62,7 | | |
| LED 33 [w] LAMP | N/A | N/A | N/A | N/A | 19,12 | [43] | Con balasto |
| LED 18 [w] TUB | N/A | N/A | N/A | N/A | 14,93 | | Con balasto |
| N/A | CFL 18 [w] | N/A | N/A | N/A | 133,6 | | Con balasto |
| N/A | CFL 9 [w] | N/A | N/A | N/A | 128,4 | | Con balasto |
| N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 47,2 | | 40 [w] inducción LAMP |
| N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 2,1 | | 70 [w] incandescente |
| N/A | CFL A | N/A | N/A | N/A | 112 | [44] | N/A |
| N/A | CFL B | N/A | N/A | N/A | 105 | | N/A |
| N/A | CFL C | N/A | N/A | N/A | 109 | | N/A |

| | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|------|------|-------------------------------------|
| N/A | CFL D | N/A | N/A | N/A | 115 | | N/A |
| Led A | N/A | N/A | N/A | N/A | 81 | | N/A |
| Led B | N/A | N/A | N/A | N/A | 62 | | N/A |
| Led C | N/A | N/A | N/A | N/A | 31 | | N/A |
| Led D | N/A | N/A | N/A | N/A | 60 | | N/A |
| N/A | 50 % CFL CADA UNA DE 20 [w] | N/A | N/A | N/A | 18,6 | [45] | 50 % incandescente cada una 100 [w] |
| 50% LED cada una de 5 [w] | N/A | N/A | N/A | N/A | 8,4 | | 50 % incandescente cada una 100 [w] |
| 50% LED cada una de 5 [w] | 50 % CFL CADA UNA DE 20 [w] | N/A | N/A | N/A | 42,5 | | N/A |
| 30% LED cada una de 5 [w] | 30 % CFL CADA UNA DE 20 [w] | N/A | N/A | N/A | 13,7 | | 40 % incandescente cada una 100 [w] |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Diferentes controladores para la iluminación LED para la reducción de distorsión armónica.

| Artículos | Controladores con reducción armónica | Generación de THD [%] | Referencias |
|---|--|-----------------------|-------------|
| The Analysis of TRIAC Dimming LED Driver by Variable Switched Capacitor for Long Life and High Power-Efficient Applications | Controlador TRIAC con filtro pasivo | 22,5 | [49] |
| LED Driver with TRIAC Dimming Control by Variable Switched Capacitance for Power Regulation | Controlador TRIAC con filtro paso bajo | 6 | [50] |
| Filter-free AC Direct LED Driver with Unity Power Factor and Low Input Current THD Using Binary Segmented Switched LED Strings and Linear Current Regulator | Controlador con componentes activos | Bajo | [51] |
| Filter Capacitor Minimization in a Flyback LED Driver Considering Input Current Harmonics and Light Flicker Characteristics | Controlador con reducción de tamaño capacitivo | Bajo | [52] |
| Temperature-Robust LC3 Passive LED Drivers with Low THD, High Efficiency and PF, and Long Life | Controlador pasivo | 10,5 | [53] |
| Low Pass Filter Installation for Reducing Harmonic Current Emissions from LED Lamps Based on EMC Standard | Filtro pasa bajo | 25,3 | [54] |
| 93% efficiency and 0.99 power factor in pseudo-linear LED driver | Controlador pseudolineal | 6 | [55] |
| A review on TRIAC control LED Lámpara | Controlador TRIAC-puente activo | Bajo | [56] |

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

- Este artículo ha expuesto varios resultados experimentales sobre generación de armónicos a partir de las luminarias LED, debido al uso

de la electrónica por medio de un controlador, impactando de forma negativa en el sistema de energía, el cual causa problemas como sobrecalentamiento, daños en equipos electrónicos sensibles, etc. Lo sorprendente es que la

distorsión armónica en su tercer armónico y THD exceden en gran medida los valores exigidos por las normas.

- Es evidente que la iluminación, LED por ser una fuente no lineal, es una fuente de armónicos considerable, más cuando opera de forma dime-rizable, de ahí la importancia de implementar un controlador que cumpla con las normas vigentes o, en su defecto, utilizar filtros que minimicen los efectos nocivos de la distorsión armónica producida por esta tecnología.
- Aún existen retos en el desarrollo de la ilumina-ción LED y su incorporación en los sistemas en corriente alterna, ya que su operación requiere de un controlador, el cual no siempre cumple con los límites establecidos en la norma IEC; por ello, es importante estudiar el impacto de esta tecnología cuando su implementación sea al 100%, tal como lo fue en su momento la bombilla incandescente.
- Un aspecto importante detectado, es que la ma-yoría de los estudios están encaminados en lu-minarias LED de menos de 25 W, dejando fuera luminarias o paneles LED que son utilizados en ambientes industriales o en el comercio y que también aportan al sistema de potencia; por tanto, es importante que se realicen estudios tendientes al análisis de estos dispositivos y sus efectos en cuanto a la contaminación armónica.

Referencias

- [1] M. Cole y T. Driscoll, "The Lighting Revolution: If We Were Experts Before, We're Novices Now". *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1509–1520, 2014.
- [2] K. Dawood, B. Alboyaci, M. Sengul, y I. G. Tekdemir, "Light Wavelength and Power Quality Characteristics of CFL and LED Lamps under Different Voltage Harmonic Levels". *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 19–26, 2017.
- [3] F. G. Montoya, A. Peña-García, A. Juaidi, y F. Manzano-Agugliaro, "Indoor lighting techniques: An Overview of Evolution and New Trends for Energy Saving". *Energy Build.*, vol. 140, pp. 50–60, 2017.
- [4] S. Yoomak y A. Ngaopitakkul, "The Study of Harmonic Reduction in Light Emitting Diode (LED) Roadway Lighting System". *Proc. - 2016 17th Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng. EPE 2016*, 2016.
- [5] F. Pop, C. Munteanu, A. Răcășan, y S. Pruşu, "The Assessment of Human Exposure to Ra-diated Fields from Different Types of Lighting". *IEEE Xplore*, Romania, june 2017, p. 6.
- [6] O. Nájara, S. García, y E. Grosso, "La plataforma virtual como herramienta didáctica dinamiza la lectura y la escritura". *Rev. Vínculos*, vol. 11, no. 1, pp. 189–202, 2014.
- [7] A. J. Wilkins, "Designing to Mitigate the Effects of Flicker Reducing Risks to Health and Safety". *IEEE Power Electron. Mag*, pp. 18–26, September 2014.
- [8] S. Lin, N. Huang, y M. Zhu, "The Study of the Power Quality Emission Characteristics of Different Types of Lamps and Their Impacts on Distribution Systems". *IEEE Xplore*, China, 2016, pp. 613–618.
- [9] P. S. Almeida, D. Camponogara, H. A. C. Braga, M. A. Dalla Costa y J. M. Alonso, "Matching LED and Driver Life Spans: A Review of Different Techniques". *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, no. 2, pp. 36–47, 2015.
- [10] A. S. De Beer, A. Emleh, H. C. Ferreira, y A. J. H. Vinck, "Effects of LED Lamps on the Power-Line Communications Channel". *ISPLC 2013 - 2013 IEEE 17th Int. Symp. Power Line Commun. Its Appl. Proc.*, pp. 209–213, 2013.
- [11] R. D. Pentiuc, C. D. Popa, A. Dascalu, y P. Atanasoae, "The Influence of LED Street Lighting Upon Power Quality in Electrical Networks". *EPE 2014 - Proc. 2014 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, pp. 1092–1098, 2014.
- [12] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, y M. A. Hannan, "An Analysis of Harmonics from LED Lamps". *2012 IEEE Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2012 - Conf. Proc.*, pp. 182–186, 2012.

- [13] C. Keyer, R. Timens, F. Buesink, y F. Leferink, "DC Pollution of AC Mains Due to Modern Compact Fluorescent Light Lamps and LED Lamps". *Proc. 2013 Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Eur. 2013), Brugge, Belgium, Sept. 2-6*, pp. 632–636, 2013.
- [14] M. A. D. Costa, R. N. Do Prado, A. R. Seidel, y F. E. Bisogno, "Performance Analysis of Electronic Ballasts for Compact Fluorescent Lamp". *Ind. Appl. Conf. 2001. Thirty-Sixth IAS Annu. Meet. Conf. Rec. 2001 IEEE*, pp. 238–243, 2001.
- [15] R. J. Bravo y N. Y. Abed, "Experimental Evaluation of the Harmonic Behavior of LED Light Bulb". *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–4, 2013.
- [16] N. Kumar, G. Kumar, y A. Kumar, "A Techno-Economic Comparative Analysis of Energy Efficient Luminaries in the Context of Emerging DSM Initiatives in India: Subtitle as Needed (Techno-Economic Comparative Analysis EE Luminaires)". *Proc. - 2011 Annu. IEEE India Conf. Eng. Sustain. Solut. INDICON-2011*, no. ii, 2011.
- [17] B. T. Erginoz y C. Yavuz, "Energy Quality Analysis and Improvement for Fluorescent and Led Light Sources". *Light Eng.*, vol. 22, no. 2, pp. 65–70, 2014.
- [18] J. Najjar y N. Suárez, "La seguridad de la información: un activo valioso de la organización". *Rev. Vinculos*, vol. 12, no. 1, pp. 89–97, 2015.
- [19] P. Verma, N. Patel, y N. K. C. Nair, "Power Quality Impacts During CFL to LED Transition". *Proc. 2016 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2016*, pp. 2–7, 2016.
- [20] H. Shabbir, M. Ur Rehman, S. A. Rehman, S. K. Sheikh, y N. Zaffar, "Assessment of Harmonic Pollution by LED Lamps in Power Systems". *2014 Clemson Univ. Power Syst. Conf. PSC 2014*, 2014.
- [21] D. Committee, I. Power, y E. Society, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society". *Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power and Energy Society*, New York, 2014, pp. 1-29.
- [22] H. Kong, C. Jettanasen, y C. Pothisarn, "Analytical Study of Harmonics Issued from LED Lamp Driver". *Proc. Int. MultiConference Eng. Comput. Sci.*, vol. II, pp. 12–15, 2014.
- [23] J. M. César Rincón, "Análisis de distorsión armónica aplicado a dos tipos de drivers dime-rizables para luminarias LED". *Tecnura*, vol. 1, no. 1, p. 47, 2017.
- [24] C. Martinsons, Y. Zong, C. Miller, Y. Ohno, F. Olive, y N. P. Martinsons, "The Power Measurement of Led Lamps and Luminaires Influence of Current and Voltage Harmonic Distortion on the Power Measurement". In *Towards a new century of light*, 2013, pp. 290–299.
- [25] S. Thuta y T. Motors, *International Standard IEC 61000-3-2*. International Electrotechnical Commission Suiza-Geneva, 2014, pp. 1-69.
- [26] J. Molina, J. J. Mesas, N. Mesbahi, y L. Sainz, "LED Lamp Modelling for Harmonic Studies in Distribution Systems". *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 4, pp. 1063–1071, 2017.
- [27] A. Pawellek y T. Duerbaum, "DetailLED Comparison of One Stage Topologies for LED Lighting Applications". *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Proceedings of VDE 2016, pp. 10–12.
- [28] N. E. S. Suárez y J. C. Najjar, "Evolución de las tecnologías de información y comunicación en el proceso de enseñanza-aprendizaje". *Vinculos*, vol. 11, no. 1, pp. 209–220, 2014.
- [29] D. Tupańska y K. Skowronek, "Energy Efficiency Analysis of Car Park Lighting in LED Technology". *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 6, pp. 310–311, 2013.
- [30] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, y M. A. Hannan, "An Analysis of Harmonic Diversity Factors Applied to LED Lamps". *2012 IEEE Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2012*, pp. 1–5, 2012.
- [31] P. Verma, N. Patel, y N.-K. C. Nair, "LED Electronics, Harmonic Issues and Augmenting Standards". *2017 IEEE Int. Conf. Consum. Electron.*, vol. 15, pp. 190–191, 2017.

- [32] S. Ananwattanaporn y A. Ngaopitakkul, "Power Quality Analysis in Light Emitting Diode Lamps". Electric Power Engineering (EPE), 2016 17th International Scientific Conference on IEEE, 2016, pp. 1-6.
- [33] B. M. Kalesar y J. Noshahr, "Evaluating Harmonic Emission in Frequency Range (2-10 KHz) of LED Street Lights in Distribution Networks". *Consum. Electron. (ICCE), 2017 IEEE Int. Conf.*, no. Lv, pp. 0–5, 2016.
- [34] G. Dos Santos Oliveira, E. P. De Oliveira, A. P. Da Silva, y C. C. M. De Moura Carvalho, "Power Quality of LED Lamps". *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 2016–December, pp. 575–580, 2016.
- [35] B. Dolník, "Contribution to the Electromagnetic Compatibility of Prototype LED Street Light". *Proc. 8th Int. Sci. Symp. Electr. Power Eng. Elektroenerg. 2015*, no. April, 2015.
- [36] B. Erginöz y C. Yavuz, "Investigation and Comparison of Energy Q Uality Parameters for Fluorescent and Led Light Sources". *Sak. Univ. J. Sci.*, vol. 2, pp. 157–161, 2015.
- [37] S. Di Mauro, S. Musumeci, A. Raciti, y G. Vasta, "Analysis of the Current Harmonics Injected into the Power Grid by Dimmable LED Lamps". *AEIT Int. Annu. Conf. (AEIT)*, pp. 1–6, 2016.
- [38] S. Uddin, H. Shareef, y A. Mohamed, "An Analysis of Harmonics from Dimmable". *Power Eng. Optim. Conf. Melaka, Malaysia, 2012 Ieee Int.*, no. June, pp. 6–7, 2012.
- [39] G. Rata, M. Rata, y C. Prodan, "Analysis of the Deforming Regime Generated by Different Light Sources, Using Reconfigurable System - CompactRIO". *Electr. Power Eng. (EPE), 2014 Int. Conf. Expo. on, IEEE.*, no. Epe, pp. 16–18, 2014.
- [40] V. CUK, J. F. G. Cobben, W. L. Kling, and R. B. Timens, "An Analysis of Diversity Factors Applied to Harmonic Emission Limits for Energy Saving Lamps". *ICHQP 2010 - 14th Int. Conf. Harmon. Qual. Power*, 2010.
- [41] M. R. Mohd. Zuhaib, Zarin Akram, "A Comparative Analysis of Effect of Different Domestic Light Sources on the Grid Using Virtual Instrumentation". *Comput. Sustain. Glob. Dev. (INDIACom), 2016 3rd Int. Conf. on, IEEE.*, pp. 1249–1253, 2016.
- [42] P. Verma, N. Patel, y N. K. C. Nair, "CFL to LED Transition: An Analysis from Harmonics Perspective". *2016 IEEE Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2016*, pp. 1–6, 2016.
- [43] F. C. Argatu, "An Analysis of Influence of Different Type of Light Sources to the Power Quality". *Electr. Power Eng. (EPE), 2016 Int. Conf. Expo. on, Rom.*, no. Epe, pp. 20–22, 2016.
- [44] S. Di Mauro y A. Raciti, "Analysis and Comparison of CFLs and LED Lamps". *2014 AEIT Annu. Conf. - From Res. to Ind. Need a More Eff. Technol. Transf. AEIT 2014*, 2015.
- [45] M. S. Islam, N. A. Chowdhury, A. K. Sakil, A. Khandakar, A. Iqbal, y H. Abu-Rub, "Power Quality Effect of Using Incandescent, Fluorescent, CFL and LED Lamps on Utility Grid". *2015 1st Work. Smart Grid Renew. Energy, SGRE 2015*, 2015.
- [46] A. Gil-De-Castro, S. K. Ronnberg, M. H. J. Bollen, y A. Moreno-Muñoz, "Harmonics From Household Equipment and Different Lamp Technologies". *Int. Conf. Compat. Power Electron. , CPE*, pp. 1–6, 2013.
- [47] D. F. Castañeda y H. A. Cárdenas, "Estudio comparativo de características eléctricas y fotométricas de LEDs de iluminación de estado sólido y CFLs para iluminación interior". *Tekhnê, Univ. Dist. Fr. José Caldas*, vol. 9, pp. 79–90, 2012.
- [48] R. Castaño Tamara, "Ciencia , tecnología y educación . Una propuesta para su enseñanza". *Rev. Vínculos*, vol. 9, no. 2, pp. 73–93, 2012.
- [49] E. S. Lee, B. H. Choi, D. T. Nguyen, y C. T. Rim, "The Analysis of TRIAC dimming LED Driver by Variable Switched Capacitor for Long Life and High Power-Efficient Applications". *9th Int. Conf. Power Electron. - ECCE Asia "Green World with Power Electron. ICPE 2015-ECCE Asia*, pp. 54–59, 2015.
- [50] E. S. Lee, J. P. Cheon, D. N. Tan, y C. T. Rim, "A Novel TRIAC Dimming LED Driver by Variable

- Switched Capacitance for Power Regulation". *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, vol. 15, no. 2, pp. 555–566, 2014.
- [51] C. Park y C. Taek Rim, "Filter-free AC Direct LED Driver with Unity Power Factor and Low Input Current THD Using Binary Segmented Switched LED Strings and Linear Current Regulator". *Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annu. IEEE, USA.*, vol. 1, no. 1, pp. 870–874, 2013.
- [52] A. Shagerdmootaab y M. Moallem, "Filter Capacitor Minimization in a Flyback LED Driver Considering Input Current Harmonics and Light Flicker Characteristics". *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 8, pp. 4467–4476, 2015.
- [53] L. Thd et al., "Temperature-Robust LC 3 Passive LED Drivers With". *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 3, pp. 829–840, 2015.
- [54] F. A. Karim, M. Ramdhani, y E. Kurniawan, "Low Pass Filter Installation for Reducing Harmonic Current Emissions from LED Lamps Based on EMC Standard". *ICCEREC 2016 - Int. Conf. Control. Electron. Renew. Energy, Commun. 2016, Conf. Proc.*, pp. 132–135, 2017.
- [55] J.-L. C. Shao-Wei Chiu, Chun-Chieh Kuo, Kai-Cheng Chuang, Wen-Hau Yang, ke-Horng Chen Chin-Long Wey, Ying-Hsi Lin, Jian-Ru Lin, Tsung-Yen Tsai, "93% Efficiency and 0.99 Power Factor in Pseudo-Linear LED Driver". *Solid-State Circuits Conf. (A-SSCC), 2016 IEEE Asian*, pp. 53–56, 2016.
- [56] V. Shere, "A Review on TRIAC Control LED Energy Efficient Dimmable LED Driver for Street Lighting". *Autom. Control Dyn. Optim. Tech. (ICACDOT), Int. Conf. on, IEEE. India.*, pp. 239–241, 2016.

