

ESTUDIO DE ARMÓNICOS EN LÁMPARAS LED DE BAJA POTENCIA Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Data de submissão: 12/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Germán Escalante Notario

Universidad Autónoma de Campeche,
Posgrado de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, Campeche,
México.
ORCID: 0000-0002-5900-4570

José Luis Juárez Sánchez

Universidad Autónoma de Campeche,
Estudiante del Posgrado de la Facultad de
Ingeniería, San Francisco de Campeche,
Campeche, México.

Francisco R. Lezama Zárraga

Universidad Autónoma de Campeche,
Facultad de Ingeniería, San Francisco de
Campeche, Campeche, México.
ORCID: 0000-0001-7475-6458

Mauricio I. Huchin Miss

Universidad Autónoma de Campeche,
Posgrado de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, Campeche,
México.
ORCID: 0000-0002-5669-9098

Meng Yen Shih

Universidad Autónoma de Campeche,
Facultad de Ingeniería, San Francisco de
Campeche, Campeche, México.
ORCID: 0000-0001-7475-6458

RESUMEN: El presente trabajo describe el estudio de la distorsión armónica en lámparas basadas en tecnología LED de baja potencia para uso residencial, también llamadas lámparas de bajo consumo. Este tipo de lámparas son consideradas dispositivos no lineales debido a sus componentes electrónicos internos. A partir de información de mercado, se seleccionó un grupo de lámparas que presentarían una alta demanda comercial, a estas lámparas se le midieron sus parámetros ópticos y eléctricos, con el objetivo de compararlas con los valores proporcionados por el fabricante. Mediante equipos de medición como el analizador de redes eléctricas, se obtuvieron las formas de onda de voltaje y corriente.

PALABRAS CLAVE: Lámparas LED, armónicos, calidad de la energía.

ABSTRACT: This paper describes the study of harmonic distortion in low-power LED-based lamps for residential use, also called low-consumption lamps. These types of lamps are considered non-linear devices due to their internal electronic components. Based on market information, a group of lamps with a high commercial demand was selected. These lamps had their optical and

electrical parameters measured, in order to compare them with the values provided by the manufacturer. Using measuring equipment such as the power grid analyzer, the voltage and current waveforms were obtained.

KEYWORDS: LED lamps, harmonics, power quality.

1 | INTRODUCCIÓN

En México en los últimos años, su consumo de energía en el sector residencial corresponde a aproximadamente una cuarta parte del consumo final total nacional de energía y se encuentra a la par del consumo nacional de energía en el sector industrial. De hecho, según datos de la Secretaría de Energía (SENER) se estima que continúe de una forma muy semejante, en una proyección realizada al 2035 como se muestra en la Figura 1 (CENACE-Gobierno de México, 2020).

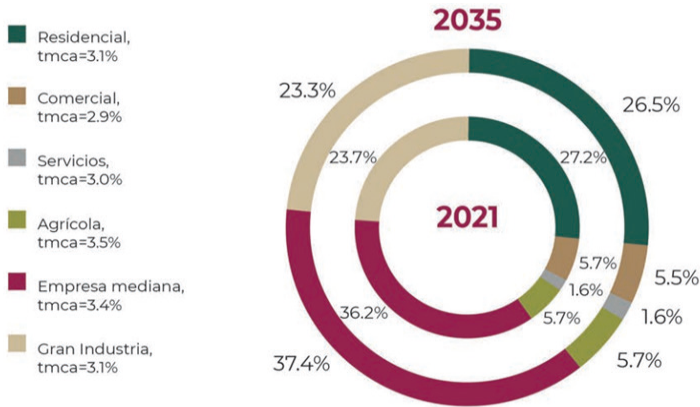


Figura 1. Consumo del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) 2021 y 2035
(CENACE-Gobierno de México, 2020).

En los sectores industrial y residencial, existe reglamentación y normatividad de código de red, sin embargo, es más estricta en el sector industrial, en referencia a los parámetros y a la contaminación de la red eléctrica Nacional (Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2016). Centrando la atención al consumo residencial de energía eléctrica, podemos considerar que está se integra por aquellas actividades de uso final como: la cocción de alimentos, refrigeración, calentamiento de agua, iluminación, calefacción y enfriamiento de espacios; además del uso de todo tipo de electrónicos y electrodomésticos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018). La iluminación es una las tecnologías más importantes en el consumo de energía en los hogares.

En las dos últimas décadas, el sector residencial mexicano ha transitado exitosamente al uso de tecnologías de iluminación más eficientes, tales como: lámparas fluorescentes compactas autobalastadas (LFCA) y lámparas de diodos emisores de luz (LED, por sus

siglas en inglés) (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2018). De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), al cierre de 2015 en las viviendas particulares habitadas había un total de 230.2 millones de puntos de luz, de los que el 77,2% se ocupaba con lámparas eficientes (LED y LFCA), y el restante 22,8% con focos incandescentes o halógenos como tecnologías de iluminación, como se muestra en la Figura 2.

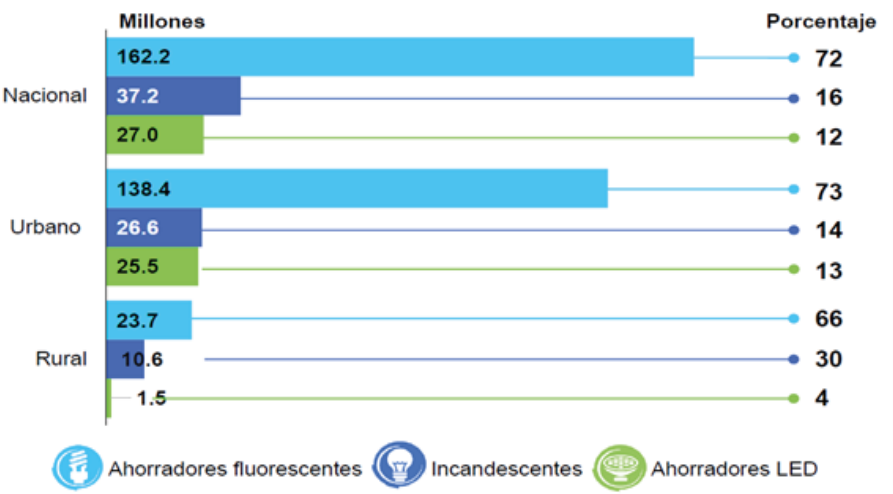


Figura 2. Número de focos y su distribución porcentual por tipo de foco y tipo de localidad (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

Esta transferencia de tecnologías eficientes de iluminación es muy significativa, dependiendo del tipo de reemplazo según la combinación de tecnología y tamaño. La CONUEE estima que hay un ahorro de energía entre 46,7% y 85%; por lo anterior, la iluminación es el uso final prioritario al acceder al servicio eléctrico en los hogares (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

La Figura 3 muestra la integración de tecnologías eficientes de iluminación alrededor del territorio nacional, las tres regiones del país (según la división del INEGI), el porcentaje de lámparas incandescentes es cercano al dato nacional (16.4%) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

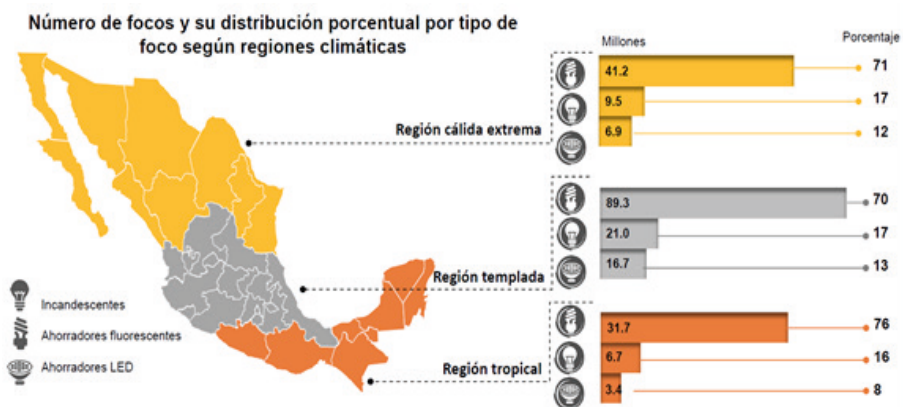


Figura 3. Distribución porcentual por tipo de foco según regiones climáticas

(Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018).

En la actualidad, se espera que la vida útil de las LFCA esté llegando a su fin, por lo que es evidente el paso libre del uso de la tecnología LED. De los datos presentados anteriormente, se podría predecir un importante crecimiento en el uso de la tecnología LED en todos los sectores consumidores de energía en el país. El bajo costo y la apertura al acceso a esta tecnología, su uso ha aumentado de forma exponencial alrededor del mundo. Además tiene la particularidad de consumir tan solo una fracción de la energía, en comparación con las luminarias convencionales. Todavía no está reglamentado el diseño de lámparas LED de baja potencia, que garanticen los mínimos efectos que producen a la Red Eléctrica, debido a armónicos y otros tipos de factores que son objeto de análisis (Normateca Ambiental, 2018).

La calidad de la energía es factor fundamental para la correcta operación de los sistemas eléctricos y de los equipos interconectados a la red eléctrica. Sin embargo, debido a la gran variedad de cargas que se pueden encontrar en la red eléctrica y a otros fenómenos como transitorios y así como los cortes de energía, la realidad suele ser diferente. La calidad de la energía de un sistema expresa hasta qué punto un sistema de suministro práctico se parece al sistema de suministro ideal. Si la calidad de energía de la red eléctrica es óptima, todas las cargas conectadas funcionarán de manera satisfactoria y eficiente. De igual manera los costos de instalación y la huella de carbono serán mínimos; las señales de tensión y corriente llegarán a todos los componentes de forma estable y sin pérdidas.

Los armónicos eléctricos son perturbaciones en la frecuencia real de la señal eléctrica que se originan dentro de las propias instalaciones. Estos generan caídas en la tensión, tanto a corto como a largo plazo, todo tipo de problemas. Es bastante extraño hacer un análisis de armónicos eléctricos dentro de entornos domésticos (aunque existen), lo más habitual es encontrarlos en grandes superficies y, sobre todo, en fábricas con mucho equipo eléctrico conectado. Estos armónicos suelen ser creados por todo tipo de equipos

electrónicos con cargas no lineales que generan la corriente en pulsos cortos y abruptos. De esta manera, los pulsos crean corrientes distorsionadas que se mezclan con el resto de la señal eléctrica alterando su funcionamiento. Se han presentado algunos trabajos, en los que se habla de los armónicos causados por el uso de la tecnología LED (Uddin et al., 2012) Srivastava et al., 2013). Sin bien es cierto, que los sistemas de iluminación LED representan una mínima carga para un sistema eléctrico, no pueden ser despreciables este tipo de cargas ya que, diversas lámparas LED conectadas a un sistema eléctrico, en conjunto con toda la carga no lineal conectada al sistema, si podría abonar a los síntomas que causan el deterioro de la red y que pueden derivar daños en los elementos que conforman al sistema eléctrico de potencia, tales como cables, cortacircuitos, o incluso transformadores de distribución.

La mencionada salida de las LFCA del mercado eléctrico nacional es evidente que la tendencia será la mayor demanda de tecnología LED, por lo que la presencia de distorsión armónica podría ser mayor si no se considera como objeto de análisis en el sector residencial; en la actualidad, el marco normativo de ley en México, solo considera las afectaciones en la red eléctrica a causa de lámparas LED con potencias mayores a 25 W, que normalmente se usan en el sector industrial o para la iluminación pública.

En el presente trabajo de investigación se plantea un análisis en lámparas LED con mismas características de voltaje, corriente y potencia, pero de diversos fabricantes para identificar las más eficientes o menos eficientes eléctricamente hablando.

2 | LUMINARIA BASADA EN LA TECNOLOGÍA LED

La tecnología LED requiere para su operación de una fuente de corriente continua (CC) y esta corriente, en una gran cantidad de aplicaciones, proviene de fuentes de corriente alterna (AC) en los cuales se hace el uso de convertidores o circuitos rectificadores para regular el voltaje y reguladores para controlar la corriente (Drivers) como se muestra en el diagrama de la Figura 4.

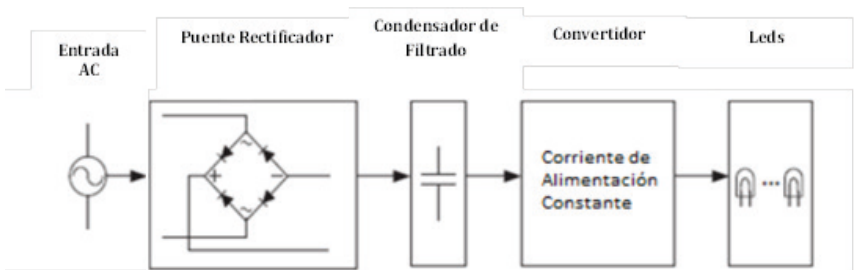


Figura 4. Diagrama de un sistema de iluminación LED (Castro Wilches, 2016).

3 | DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL

En primer lugar, se realizó el desarrollo de una metodología para poder llevar a cabo el proceso experimental donde se evaluaron los diversos parámetros eléctricos de las lámparas LED (ver Figura 5).

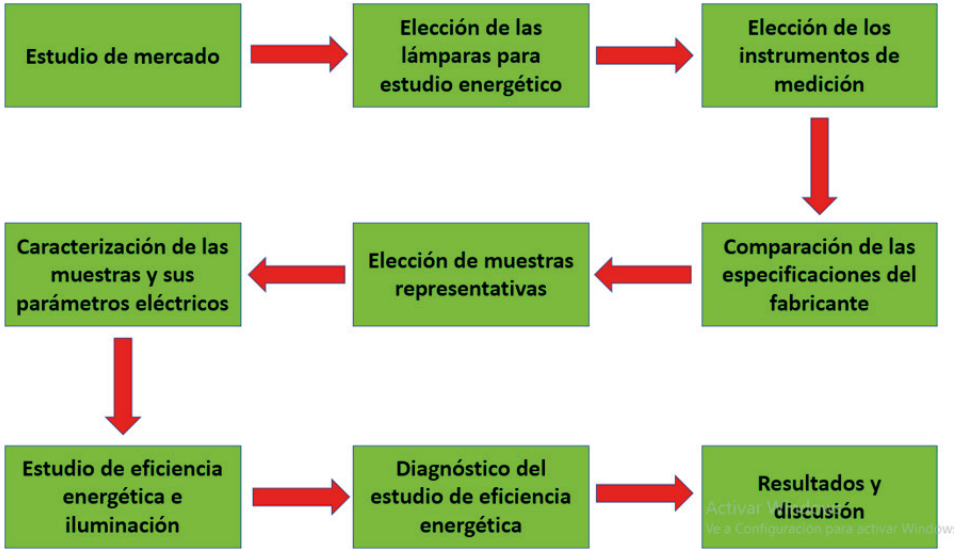


Figura 5. Diagrama a bloques del procedimiento metodológico del estudio de calidad y eficiencia energética en lámparas LED.

3.1 Selección de lámparas LED como objetivo de estudio

En el mercado de iluminación a nivel nacional, existe gran variedad de lámparas de tecnología LED de uso residencial, por consiguiente se seleccionó un grupo de lámparas como objeto de estudio en función de sus características eléctricas y ópticas, así como, su demanda en el mercado (ver Figura 6).



Figura 6. Lâmparas seleccionadas como objeto de estudio.

Durante la etapa de la tecnología incandescente (predecesora a la tecnología fluorescente y LED), la lámpara de 60 W fue la de mayor comercialización a nivel residencial. Por esta razón, el presente trabajo se centra en lámparas LED que representen equivalencia en potencia eléctrica a 60 W. Es decir, lámparas LED de potencia eléctrica en el rango de 8 a 10 W, con flujo luminoso en el rango de 800 a 950 lúmenes. Respecto al tipo de luz, se eligió luz blanca ya que esta abarca un rango más amplio en el espectro electromagnético.

3.2 Estudio de eficiencia energética en lámparas LED

El estudio de la calidad de energía en lámparas LED se realizó para evaluar los parámetros eléctricos tales como, el factor de potencia y la distorsión armónica total en corriente (THDi), a fin de poder establecer similitudes y diferencias tecnológicas entre las diferentes lámparas que fueron objeto de estudio. Por lo anterior, se implementó un banco de pruebas con instrumentos de medición (ver Figura 7) para realizar dicho estudio.



Figura 7. Diagrama de conexiones del banco de prueba para el estudio de la calidad de energía en las lámparas LED.

4 | ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ESPECIFICACIONES DE LÁMPARAS LED

La Tabla 1 presenta los parámetros eléctricos y ópticos obtenidos de las especificaciones del fabricante de cada una de las lámparas LED seleccionadas como caso de estudio.

Muestra	Potencia (W)	Intensidad luminosa (lm)	Corriente (mA)	Factor de potencia (%)
L 1	9	810	N/R	N/R
L 2	8	800	129	0.4
L 3	8.5	800	110 / 114	N/R
L 4	8	800	116	≥ 0.5
L 5	9	830	N/R	N/R
L 6	8	800	150	> 0.5
L 7	8.5	840	134	N/R
L 8	10	950	80	N/R
L 9	10	900	N/R	N/R

* N/R = No reporta

Tabla 1. Parámetros eléctricos y ópticos del fabricante de las lámparas LED.

Una vez recabadas las especificaciones del fabricante (parámetros eléctricos y ópticos) de cada una de las lámparas LED estudiadas, se verificaron en forma experimental

haciendo uso de instrumentos de medición (medidor de potencia, luxómetro, pinza amperimétrica y osciloscopio), con el objetivo de realizar un estudio comparativo entre los valores teóricos y experimentales (ver Tabla 2); para poder identificar el comportamiento eléctrico, calidad de energía y eficiencia energética de las lámparas LED.

Muestra	Potencia (W)	Intensidad luminosa (lm)	Corriente (mA)	Factor de potencia (%)
L 1	9.4	645 a 676	81.7	0.948
L 2	7.8	852 a 880	114.8	0.561
L 3	8.7	625 a 645	118	0.611
L 4	8.7	980 a 1079	93	0.613
L 5	7.9	554 a 632	68.8	0.954
L 6	7.2	955 a 1024	99.4	0.576
L 7	7.5	841 a 882	108.3	0.582
L 8	9.5	1534 a 1628	132.4	0.624
L 9	7.5	510 a 570	49.3	0.927

Tabla 2. Parámetros eléctricos y ópticos experimentales de las lámparas LED.

De la tabla anterior, la comparación entre los datos teóricos (proporcionados por el fabricante) y los datos experimentales, tanto de consumo de potencia y factor de potencia, algunas lámparas presentan valores altos de factor de potencia por lo que se estima que el contenido armónico en dichas lámparas debe de ser bajo. En el caso de la intensidad luminosa, la cantidad de lúmenes es relativamente baja en las lámparas con valores altos de factor de potencia.

4.1 Caracterización óptica de lámparas LED

La caracterización óptica de las lámparas LED se realizó en aquellas cuyo valor de potencia experimental fue lo más cercano al valor teórico, resultando las muestras L1, L2, L3 y L6. La Figura 8 muestra los espectros lumínicos de las lámparas LED antes mencionadas, los cuales, fueron obtenidos con un instrumento didáctico de iluminancia, después un periodo de encendido hasta lograr su temperatura de estabilización de cada lámpara.

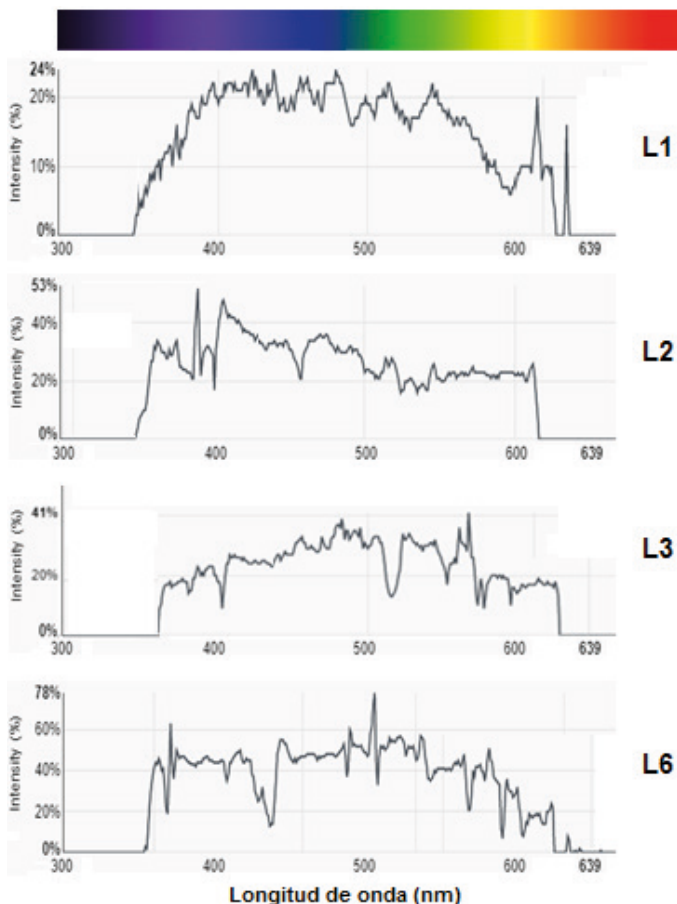


Figura 8. Espectros lumínicos de las lámparas LED L1, L2, L3 y L6.

Los espectros de las lámparas muestran intensidades relativas en longitudes de onda del orden de 350 a 620 nm, correspondientes a la región de luz ultravioleta y visible (LUMEX, 2023). En el caso de la lámpara L1 presenta un espectro más estable en todo su rango de emisión (de 380 a 580 nm) en comparación al resto de las muestras, con una intensidad relativa promedio del 18%. En cambio, las lámparas L2 y L6 presentan emisión UV en longitudes de onda menores a 380 nm cuyas intensidades superan el 30%. Este tipo de radiación en lámparas, aunque sean de baja potencia produce varios efectos en la salud, principalmente al ojo humano para tiempos de exposición muy prolongados, al ser una radiación entre no-ionizante e ionizante (Comisión Europea, 2023).

4.2 Estudio de distorsión armónica de lámparas LED

El estudio de distorsión armónica se realizó a las lámparas LED del apartado anterior, seleccionando las lámparas L1, L2 y L6 para realizar una analogía del comportamiento de

calidad de energía, tanto para la lámpara LED que tiene el valor más alto de factor de potencia, contra las dos lámparas que presentaron los valores experimentales más bajos de factor de potencia entre todo el grupo de muestras del caso de estudio. Por medio del analizador de redes eléctricas se obtienen los resultados eléctricos y de distorsión armónica de las tres lámparas LED, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Muestra	THD (%)	Corriente (mA)	Factor de potencia (%)
L 1	32.4	81.7	0.95
L 2	138.6	114.8	0.56
L 6	131.8	99.4	0.58

Tabla 3. Parámetros eléctricos y de distorsión armónica de las lámparas LED L1, L2 y L6 adquiridas para el estudio de calidad.

La lámpara L1 presenta el menor porcentaje de THD (distorsión armónica total) en comparación con las lámparas L2 y L6. Dichas lámparas presenta valores ineficientes (alto porcentaje de TDH y bajo factor de potencia) en el estudio de calidad de la energía, con respecto a todas las lámparas estudiadas en el presente trabajo. La Figura 9 muestra las gráficas espectro armónico y forma de onda de voltaje-corriente de la lámpara LED L1. El espectro armonico presenta un bajo porcentaje de distorsión armonica de corriente entre sus ordenes de armonico del 3 al 29 (ver Figura 9a).

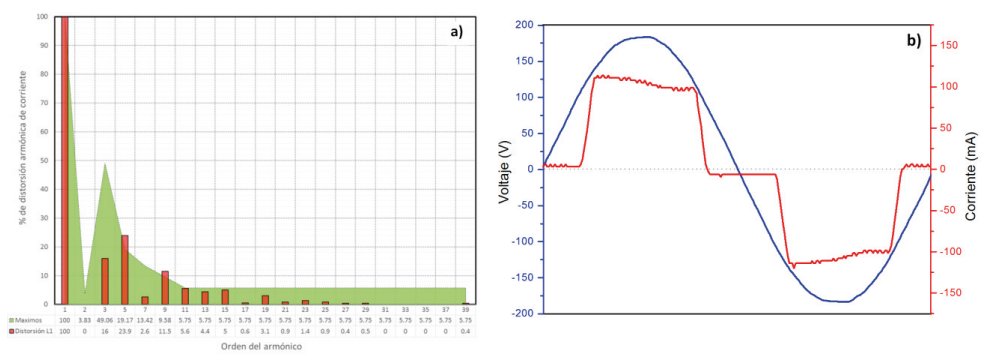


Figura 9. Gráficas de la lámpara L1: a) espectro de armónicos de la corriente, b) formas de onda de voltaje y corriente.

La Figura 9b muestra la señal de corriente con cierta distorsion de su señal original (sinusoidal). Cuando esta onda medida se encuentra distorsionada, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicos (Mario Salvador Esparza González, 2006).

En el caso de las lamparas LED L2 y L6, sus gráficas de espectro armónico y forma de onda de voltaje-corriente se muestran en las Figuras 10 y 11, respectivamente. Ambas lámparas, contienen un alto contenido de corriente armonica en orden 3,5,7,9 y hasta 11,

por lo que el porcentaje de THD es elevado.

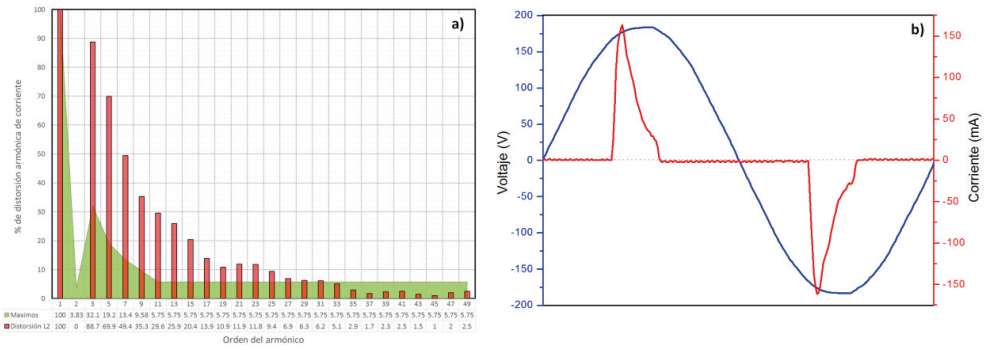


Figura 10. Gráficas de la lámpara L2: a) Espectro de armónicos de la corriente, b) formas de onda de voltaje y corriente.

Generalmente, el tercer, quinto y séptimo armónico tienen mayor influencia en los sistemas de potencia. Cada armónico se expresa en función de su orden, los armónicos de segundo, tercer y quinto orden, tienen frecuencias de 120, 180 y 300 Hz, respectivamente; en sistemas eléctricos con frecuencias de generación de 60 Hz (John Paschal, 2001).

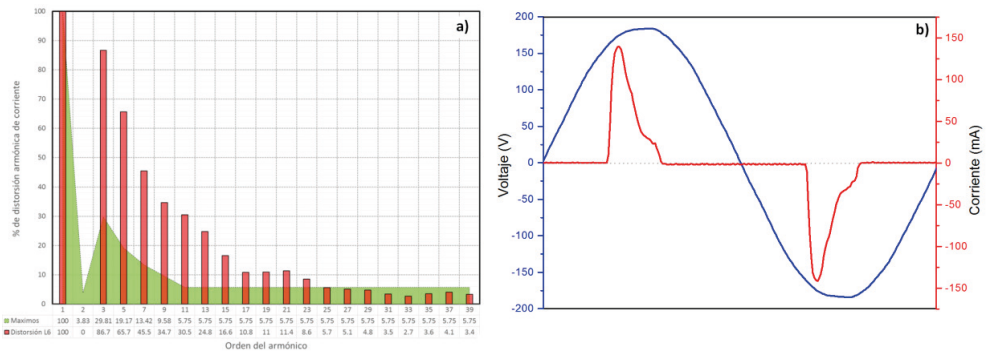


Figura 11. Gráficas de la lámpara L6: a) Espectro de armónicos de la corriente, b) formas de onda de voltaje y corriente.

Las lámparas L2 y L6 presentan un bajo factor de potencia y su intensidad luminosa fue relativamente baja si consideramos que su demanda de corriente fueron de las más altas. Las gráficas de las Figuras 10b y 11b, muestran una mayor distorsión en las formas de onda de corriente, un alto contenido de señales armónicas que continúan presentes por encima del orden 11 de armónico. Por lo tanto, ambas lámparas presentaron los valores más altos de THD. Un alto nivel de distorsión de la señal de corriente o tensión está relacionado con la inestabilidad del sistema de suministro de energía, mayor consumo de energía reactiva, aumento de las pérdidas de potencia activa, una reducción en la eficiencia y durabilidad de los dispositivos (Luis Deschères, 2021).

La reducción de la distorsión armónica en lámparas de tecnología LED, hará más eficiente su desempeño energético y mantendrá las condiciones de calidad en la energía eléctrica que suministra. La calidad de la energía es factor fundamental para la correcta operación de los sistemas eléctricos y de los equipos interconectados a la red eléctrica. Si la calidad de energía de la red eléctrica es óptima, todas las cargas conectadas funcionarán de manera satisfactoria y eficiente.

5 | CONCLUSIONES

El estudio sobre los parámetros eléctricos y ópticos del grupo de 9 lámparas LED comerciales de uso residencial, contrastó los resultados experimentales y teóricos, en el cual, solo en 4 lámparas LED presentaron valores similares, el resto de lámparas no reúnen los valores que el fabricante proporciona. Las lámparas L2 y L6 presentan emisión ultravioleta en longitudes menores a 380 nm cuyas intensidades superan el 30%. Este tipo de radiación, en lámparas LED aunque de baja potencia produce efectos a la salud, principalmente al ojo humano para tiempos de exposición prolongados, al ser una radiación entre no-ionizante e ionizante. La lámpara LED L1 presentó el menor porcentaje de THD y el valor más de factor de potencia 0.95, lo que la hace la lámpara LED con mayor eficiencia energética. Sin embargo, las lámparas con mayor ineficiencia en el estudio de la calidad de la energía fueron las lámparas L2 y L6, con valores altos de porcentaje de TDH y su factor de potencia fueron los más bajos. A raíz de la distorsión armónica total de corriente obtenida mediante las mediciones realizadas con el analizador de redes se obtuvo una forma de onda distorsionada en cada lámpara analizada. Se puede decir que, mientras mayor es el factor de potencia de las luminarias, la onda obtenida es similar a su onda sinusoidal original.

REFERENCIAS

Castro Wilches, J. A. H. P. G. A. (2016). *Diseño e implementación de un driver para bombillas domiciliarias led con corrector de factor de potencia y disminución de THD*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

CENACE - Gobierno de México. (2020). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN)*. <https://www.gob.mx/cenace>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2018). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México*. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/43612/S1800496_es.pdf

Comisión Europea. (2023). *Efectos de la luz artificial sobre la salud*. https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/artificial-light/es/index.htm

Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2016). *Disposiciones Administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red, conforme dispone el artículo 12, fracción XXXVII de la Ley de la Industria Eléctrica*. [https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/SENyMEM/\(DOF%202016-04-08%20CRE\)%20RES-151-2016%20DACG%20C%C3%B3digo%20de%20Red.pdf](https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/SENyMEM/(DOF%202016-04-08%20CRE)%20RES-151-2016%20DACG%20C%C3%B3digo%20de%20Red.pdf)

Henao Peñaranda, G. Alexander. C. W. J. Alexis. (2016). *Diseño e implementación de un driver para bombillas domiciliarias led con corrector de factor de potencia y disminución de THD*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI)*. 2018. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>

John Paschal. (2001). *Practical Guide to Power Factor Correction and Harmonics* (Intertec Publishing Corp., Ed.).

Luis Deschères. (2021). Impacto de la iluminación LED en la calidad de la energía. *Revista Luminotecnia*. https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/luminotecnia_151_abril_junio_2021_0.pdf

LUMEX. (2023). *LEDs and Colour*. <https://lednique.com/leds-and-colour/>

Mario Salvador Esparza González, J. A. M. G. L. A. C. R. (2006). Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus Soluciones. *Conciencia Tecnológica*, 22. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94403211.pdf>

Normateca Ambiental. (2018). *Norma Oficial Mexicana sobre eficiencia energética de lámparas*. <https://normatecamambiental.org/2018/03/09/se-emite-norma-oficial-mexicana-sobre-eficiencia-energetica-de-lamparas/>

Srivastava, K. K., Shakil, S., & Pandey, A. V. (2013). *Harmonics & Its Mitigation Technique by Passive Shunt Filter*.

Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A., & Hannan, M. A. (2012b). An analysis of harmonics from LED lamps. *2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 837–840. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2012.6238014>