

EVALUACIÓN ELÉCTRICA DE LÁMPARAS DE ILUMINACIÓN*

JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ-CORONA**

<https://orcid.org/0000-0001-9209-9287>

Universidad Tecnológica de Tlaxcala, Departamento de Ingeniería, Tlaxcala, México

PABLO SÁNCHEZ-LÓPEZ

<https://orcid.org/0000-0002-0882-8342>

Universidad Tecnológica de Tlaxcala, Departamento de Ingeniería, Tlaxcala, México

Recibido: 31 de julio del 2023 / Aceptado: 4 de septiembre del 2023

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2023.n45.6577>

RESUMEN. Este artículo tiene como propósito reconocer los armónicos provocados por contaminación con cargas no lineales, tales como las lámparas ahorradoras y led de diez vatios. Se comparan estas lámparas con unas incandescentes de la misma potencia para evaluar la forma de onda sinusoidal. Además, se estudian los parámetros eléctricos de potencias, voltajes y corriente, así como los porcentajes de las distorsiones armónicas totales. Estos resultados se evalúan con la aplicación del módulo para medición de calidad de la energía NI cRIO-9023 y los módulos de voltaje NI-9225 y corriente NI-9227. Los parámetros de visualización se presentan en forma gráfica y numérica a través del ENA-Touch. Asimismo, se desarrolla una medición del espectro infrarrojo para la determinación de la temperatura de la línea y del neutro, y se lleva a cabo el diseño de un filtro atenuador de armónicos, pasa altos de segundo orden RLC, para atenuar con este la contaminación armónica de corriente, pues esta es la que presenta una alteración en su contaminación. Finalmente, los resultados muestran una disminución de la amplitud armónica y el porcentaje de la distorsión armónica total.

PALABRAS CLAVE: armónicos / filtro atenuador / cargas no lineales / calidad de la energía / contaminación / filtro

* Este estudio fue financiado por la Universidad Tecnológica de Tlaxcala.

** Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: coronaluis@uttlaxcala.edu.mx; pablo.sanchez@uttlaxcala.edu.mx

ELECTRICAL EVALUATION OF LIGHTING LAMPS

ABSTRACT. The purpose of this research was to identify the harmonics caused by the pollution with non-linear loads such as energy-saving lamps and 10W LEDs. These lamps were compared with an incandescent lamp of the same power to establish the sinusoidal waveform. Electrical power, voltage, and current, as well as total harmonic distortion percentages, were studied. These results were evaluated with the NI cRIO-9023 controller for measuring power quality, and the NI-9225 voltage and NI-9227 current input modules. The visualization parameters were graphically and numerically displayed using ENA-Touch. The infrared spectrum was measured to determine the temperature of the power supply line and the neutral conductor. A harmonic attenuator filter, i.e., a second order high-pass RLC filter, was designed to mitigate the harmonic pollution. The results showed a decrease in the harmonic amplitude and the total harmonic distortion percentage.

KEYWORDS: harmonics / attenuator / non-linear loads / power quality / pollution / filter

1. INTRODUCCIÓN

El nacimiento de las redes eléctricas entre 1860 y 1885, con la puesta en operación de distintos componentes eléctricos, se llevó a cabo con la finalidad de crear una red de distribución que alimente al alumbrado y a la calefacción. Estos componentes operaban con corriente directa, lo que era un inconveniente, ya que este tipo de energía no se podía transmitir a grandes distancias, pues no podía elevar la tensión, lo que producía pérdidas por efecto Joule. Esto se solucionó con el sistema de distribución de corriente alterna, patentado por John Gibbs y Lucien Gaulard, y basado en la aplicación del transformador de corriente alterna inventado por Faraday y Henry en 1831. Años más tarde, George Westinghouse compró las patentes e inició la distribución exitosa de la corriente alterna (Yebra Morón, 2021).

Al inicio de la electrificación, los componentes utilizados fueron del tipo pasivo o comúnmente denominados cargas lineales: resistencias, bobinas o condensadores. Estos componentes no generaban alteraciones en la forma de onda, onda senoidal que suministraba la compañía suministradora de energía (Pérez et al., 1999).

Los beneficios que trajo el descubrimiento de la energía eléctrica están en sus diversas formas de aplicación, tales como pulsos, calor, ondas o radiación electromagnética, microondas, luz, entre otros. Hacen la vida más placentera o confortable, pues su uso es variado y con mayores aplicaciones cada vez. En México, la red de distribución de energía eléctrica o sistema de distribución es la parte que corresponde desde el suministro eléctrico hasta los usuarios finales: hogares, comercios, instituciones gubernamentales y empresas, cuya distribución se lleva a cabo en diferentes valores de tensión de consumo. Además, esta energía debe estar libre de cualquier tipo de perturbación que afecte el funcionamiento de los equipos conectados al sistema eléctrico (Hernández Ochoa, 2018).

Los beneficios son buenos, pero traen las perturbaciones ocasionadas por dispositivos no lineales. Esto provoca la generación de armónicos, ya sea de tensión o de corriente. De aquí la importancia del estudio de contaminación para comprender su funcionamiento y predecir las corrientes armónicas que se inyectan al sistema (Arrillaga & Watson, 2003).

Entonces, debido al aumento de equipos de electrónica, el problema de la contaminación y el tratamiento armónico adquieren gran importancia. Estos armónicos interfieren con los equipos electrónicos sensibles y provocan pérdidas de energía no deseadas en los equipos eléctricos (Benachaiba & Ferdi, 2007; El Mofty & Youssef, 2010).

Un problema actual asociado a la calidad de la energía es la distorsión de la onda de voltaje, corriente o frecuencia, la que causa un mal funcionamiento de equipos sensibles o el calentamiento excesivo de conductores. Por un lado, obliga al uso de equipos especializados para medir armónicos en sistemas reales y proponer posibles soluciones; por otra parte, obliga a las empresas suministradoras a aumentar la potencia aparente para mantener una fuente de alimentación confiable (Erazo Ávila & Guamán Segarra, 2022).

La compañía suministradora ha presentado más atención a un mejor uso de la electricidad en los últimos años, debido a la distorsión de corriente que se origina por cargas no lineales por parte de los usuarios (Mora-Barajas & Bañuelos-Sánchez, 2010). El incremento de averías en los transformadores de distribución es un fenómeno asociado, de la misma manera, a la contaminación provocada por el usuario, por el incremento de componentes electrónicos. Esto origina una contaminación de ondas no senoidales en la red y cuyos valores de frecuencia, para la República mexicana, es de 60 Hz; mientras que los armónicos son múltiplos enteros de la fundamental: 120, 180, 240, 300, ... n ciclos por segundo (Ruggero & Sánchez, 2014).

El problema generado por las distorsiones armónicas va disminuyendo la calidad de la energía y continuará con este proceso debido al uso creciente de equipo de iluminación, que es más eficiente y de bajo costo, así como la ausencia de normativas que limitan las cargas no lineales en sistema de distribución doméstica (Esparza González et al., 2006).

Frente a ello, la normativa internacional IEC 61000-4-30 define la calidad de la energía, como las características de la electricidad en un punto dado de la red eléctrica, con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia (tensión, voltaje y frecuencia).

El uso creciente de equipos con componentes electrónicos provoca un aumento en las perturbaciones y afecta las características del suministro eléctrico (tensión y voltaje), por parte de los consumidores de energía. Esto da lugar a un suministro eléctrico fuera de límites establecidos en la norma IEEE Std 519-2014, el cual se muestra en la Tabla 1, con respecto al punto común de acoplamiento.

Tabla 1
Armónicos de corriente

Máxima corriente de distorsión armónica en porcentaje de la I_L						
Orden de los armónicos individuales						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 200	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Nota. I_L : corriente de carga; I_{sc} : corriente de circuito; TDD: distorsión de la demanda total; h : armónicos. De Institute of Electrical and Electronics Engineers (2014, p. 7).

En los hogares, los dispositivos electrónicos —como televisores, VCR y computadoras—, generan armónicos de voltaje y corriente que aumentan las pérdidas de energía y contaminan las líneas eléctricas. Esto puede causar estragos en la red y en los dispositivos a los que están conectados (Barajas & Bañuelos-Sánchez, 2010). El desarrollo de diversas investigaciones, basadas en el estudio de cargas productoras de energía contaminante de tensión, corriente y frecuencia, va enfocado al estudio de los armónicos, además de las perturbaciones eléctricas que afectan cada vez, y en mayor medida, a los sistemas eléctricos-electrónicos de los consumidores, así como a la red de distribución.

En el escenario que nos presenta el nuevo milenio, el uso de cargas no lineales en los sistemas eléctricos va en aumento, principalmente por el crecimiento de la electrónica de potencia, que se traduce en el desarrollo de investigaciones encaminadas a un uso más eficiente de la electricidad y un aumento significativo de la productividad en los procesos industriales. Pero esta distancia tiene el efecto contrario, la corriente armónica generada por equipos eléctricos distorsiona la onda de corriente sinusoidal original (Amaya-Vásquez & Inga-Ortega, 2022).

El desarrollo de nuevas investigaciones se enfoca en la evaluación de la contaminación lumínica que generan las lámparas de nueva generación, con el fin de conocer la cantidad de disturbios producidos y las afectaciones provocadas por contener frecuencias dañinas en diferentes ciclos de la vida, por ser estas una luz artificial. De esta manera, en los humanos se presentan algunos cambios en los comportamientos, principalmente en la visión y ritmos circadianos; mientras que en las plantas, los cambios se dan en los ritmos biológicos, pues se adelantan las estaciones (Brady, 2017).

Existen ventajas y desventajas de técnicas aplicadas al realizar estudios con procesamientos de las señales digitales que identifican frecuencias armónicas, de lo que se observa una distorsión de la onda de voltaje y de la onda de corriente, en una red de alimentación eléctrica. Se toma como referencia las técnicas clásicas que determinan la distorsión armónica de una señal eléctrica (O'Reilly, 2020).

El uso de nuevas tecnologías en iluminación, por un lado, nos lleva a un ahorro sustancial de energía y reduce con esto la contaminación ambiental de las plantas generadoras que se alimentan de combustibles no renovables; sin embargo, por otro lado, la generación de residuos al desechar las lámparas es un problema cada día más creciente.

Durante mucho tiempo, la falta de planificación ante el crecimiento de las redes eléctricas ha generado diversos problemas; el más importante es la estabilidad en la tensión. En un principio, el interés por este problema se dio por la falta de conocimiento del mismo. Al elevarse la demanda eléctrica en los centros de consumo, se incrementa la cantidad de contaminantes, por lo que aumentan los problemas de inestabilidad.

Este fenómeno es provocado por la capacidad de producción y transmisión, ya que no aumenta en la misma proporción, por lo que el sistema energético opera cada vez más cerca de sus límites de estabilidad (Palacios, 2020).

En los sistemas electrónicos, los voltajes y las corrientes armónicas pueden interferir con los dispositivos de control y protección. Se presentan pérdidas del cable por corrientes armónicas, las cuales son mayores, por lo que la temperatura aumenta.

Cualquier equipo afectado por tensiones o corrientes armónicas sufrirá pérdidas y, en última instancia, seguramente se degradará su funcionalidad. El estudio de calidad de la energía eléctrica nos permite identificar y solucionar problemas del sistema de distribución. Para la alimentación monofásica no existen métodos de mitigación, aun cuando el problema se incrementa día a día. Existen variables de mediciones o para cálculo usadas para indicar el contenido de armónicos:

Distorsión armónica total de voltaje (THD_V):

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_{RMS}^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (1)$$

Distorsión armónica total de corriente (THD_I):

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (2)$$

Donde:

V_{RMS} : Valor eficaz o valor cuadrático medio de la tensión

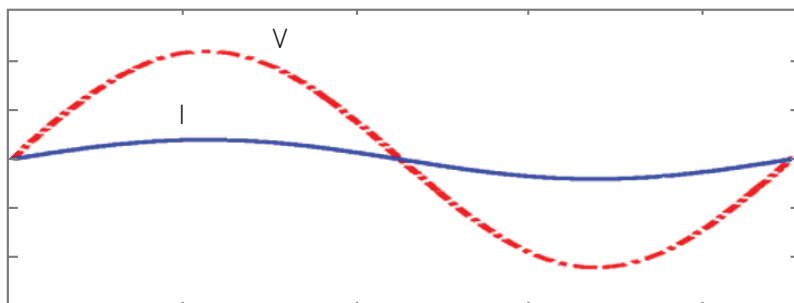
V_1 : Valor fundamental de la tensión con sus respectivas distorsiones armónicas

I_1 : Valor fundamental de la corriente

La iluminación incandescente mantiene las características de las ondas de tensión y corriente, tal como se observa en la Figura 1. Esta onda es conocida por su forma ideal.

Figura 1

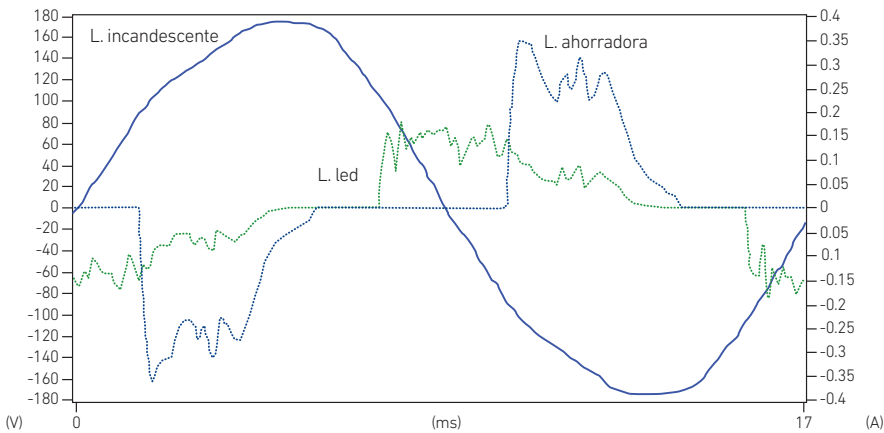
Curva de tensión y corriente para iluminación incandescente



La curva que se obtiene de tensión y corriente de una carga define si es sistema lineal o no y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales (Ramírez, 2008). Las cargas no lineales requieren corrientes no sinusoidales, que provocan caídas de voltaje no sinusoidales a través de la impedancia del sistema, lo que resulta en una distorsión de voltaje en los terminales de carga. Un problema de la calidad de la energía se manifiesta en forma de perturbaciones, los que hacen que la tensión o corriente cambien y se presente una distorsión de onda como se observa en la Figura 2 y donde se muestra la salida gráfica del ENA-Touch. Para los elementos estudiados, esta interfaz permite observar el comportamiento de la corriente medida en tiempo real.

Figura 2

Curva de tensión y corriente, lámpara incandescente, ahorradora y led



Esta distorsión, o deterioro de la onda de voltaje y corriente, se va a manifestar en diferentes fenómenos. Para el caso ideal de un circuito pasivo que contenga $R = 0$, $X_c = 0$ y $X_L = 0$, se aplica la tensión senoidal tal como sigue:

$$u(t) = U_{m\acute{a}x} * \text{sen}(\omega * t) \quad (3)$$

Para la corrección de la calidad de la energía, la teoría de la potencia reactiva instantánea es, desde su publicación, la más utilizada en la compensación de cargas no lineales mediante filtros activos de potencia de conexión paralela. En los últimos años, se han planteado soluciones proponiendo otras opciones de compensación, que permiten plantear soluciones encaminadas a transformar las coordenadas, para evitar la distorsión de onda (Andreassen et al., 2014).

En sistemas monofásicos existen cargas no lineales, debidas a componentes electrónicos, que ocasionan que la corriente del neutro pueda ser mayor que la corriente de fase, medida con el Compact Rio. En estas situaciones, esto conduce a un sobrecalentamiento excesivo del conductor neutro, ya que este conductor no dispone de un sistema de protección que limite la corriente, como ocurre con los conductores de fase. Una corriente excesiva en neutro también puede causar una diferencia de voltaje excesiva entre los conductores neutros y a tierra. La confiabilidad de la energía debida a distorsiones provoca siete efectos (véase la Tabla 2).

Tabla 2
Efectos de la distorsión armónica

Número	Efecto	Descripción
1	Tensiones armónicas	Provocan falsos disparos en los circuitos, mal funcionamiento en equipos y errores de sincronización de sistemas de suministro ininterrumpido de energía (UPS).
2	Corrientes armónicas	Provoca calentamiento excesivo en conductores.
3	Temperatura	El aumento de la temperatura es provocado por corrientes de alta frecuencia.
4	Esfuerzos térmicos	El ciclo de vida se reduce, lo que provoca pérdidas por temperaturas de operación.
5	Carga crítica	Consumo excesivo de corriente por armónicos.
6	Sobredimensionamiento	Los conductores neutros se considerarán con un diámetro mayor.
7	Factor de potencia	El factor de potencia ideal es 1, lo que indica un excelente aprovechamiento de la energía y el total de la eficiencia utilizada.

Existen muchos estudios sobre las mediciones y los efectos de los armónicos realizados en el pasado y en los últimos años. Sin embargo, no hay estudios suficientes que modelen un sistema de distribución monofásico a través de armónicos u otros problemas de calidad eléctrica. Algunas de dichas investigaciones son las siguientes: prototipos para medición de armónicos (Petit Suárez et al., 2003), análisis general de armónicos en sistemas eléctricos monofásicos (Chacón García & Ruiz Moreno, 2008), efecto de los armónicos en los motores asíncronos con capacitor de marcha (Viego Felipe et al., 2014), armónicos en sistemas eléctricos (Llamas Terrés et al., 2014), aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos (Rojas, et al., 2014).

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo, Área de Calidad de la Energía de la Universidad Tecnológica de Tlaxcala. La investigación se llevó a cabo al aplicar la siguiente estructura:

1. Medición de variables eléctricas de las lámparas
2. Medición de contaminación eléctrica
3. Comparación de distorsión armónica
4. Medición de armónicos de voltaje y corriente
5. Cálculo de filtro para eliminación de armónicos

Los elementos de estudio empleados son de las mismas características de potencia (diez vatios). Se le agregaron apagadores al módulo de medición de calidad de la energía. Estos permitieron realizar una secuencia de alimentación en forma individual para las variables eléctricas o para la obtención de la contaminación con las tres lámparas.

2.1 Medición de variables eléctricas de las lámparas

La aplicación del módulo de medición para calidad de la energía de cRIO de National Instruments, NI cRIO-9023 y NI 9227 (véase la Figura 3) es un sistema con capacidades de procesamiento de alto rendimiento. Este tiene un conjunto de herramientas de *software*, con aplicaciones ideales del internet industrial de las cosas (IoT), para monitoreo y control.

El equipo permitió llevar a cabo las mediciones de las variables eléctricas en forma individual.

Figura 3

Módulo de calidad de la energía de National Instruments



El monitoreo se llevó a cabo en tiempo real para cada uno de los elementos de estudio, pues el módulo compact RIO muestra los resultados en tiempo real. Este consta de un controlador integrado de alto rendimiento que presenta una gran robustez y está certificado con estándares industriales, visión y movimiento integrados, comunicación industrial y capacidades de interfaz humano-máquina, clasificado en la clase A por la IEC 61000-4-30. Además, contiene un procesador que ejecuta de manera confiable y determinista aplicaciones de Lab VIEW Real-Time, con salida numérica y gráfica al ENA Touch. También ofrece control de velocidad variable, rastreo de ejecución, registro de datos integrado y comunicación con periféricos (Andreassen et al., 2014).

El método de muestreo aplicado para la obtención de las variables eléctricas es el método cuantitativo, con el cual se analizan los siguientes elementos: una lámpara incandescente, una lámpara ahorradora y una lámpara led. Los elementos de estudio antes mencionados tienen una potencia de fábrica de diez vatios cada uno. Tanto los valores que arroja la medición de las variables eléctricas como los resultados para las variables de voltajes se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3
Valores de tensión

Variable de tensión	Lámpara incandescente	Lámpara ahorradora	Lámpara led
V RMS	126	126	126
V PK	178,2	171,1	177,5
V HM	6,4	6,3	6,3
CF	1,41	1,41	1,41
THD-R (en porcentaje)	5	5	5
THD-F (en porcentaje)	5,1	4,9	5,0

Nota. V RMS: voltaje radio medio simétrico (voltios). V PK: valor cresta de la tensión (voltios). V HM: tensión armónica total presente (voltios). CF: factor cresta (en porcentaje). THD-F: distorsión armónica total, porcentaje de la fundamental. THD-R: distorsión armónica total, porcentaje de la RME total.

Los resultados obtenidos para el análisis de la corriente se muestran en la Tabla 4. Ahí se observa que la corriente armónica es mayor a la corriente total, debido a los armónicos presentes en los componentes electrónicos.

Tabla 4*Valores de corriente*

Variable de tensión	Lámpara incandescente	Lámpara ahorradora	Lámpara led
A RMS	0,0800	0,0755	0,0778
A PK	0,100	0,230	0,267
A HM	0,83	0,82	0,81
CF	1,47	1,52	1,52
THD-R (en porcentaje)	22,00	21,21	21,10
THD-F (en porcentaje)	22,1	21,7	22,3

Nota. A RMS: valor efectivo de la señal o raíz cuadrada media (Amp). A PK: amper pico (Amp). A HM: corriente armónica total presente (Amp). CF: factor cresta (en porcentaje). THD-F: distorsión armónica total, porcentaje de la fundamental. THD-R: distorsión armónica total, porcentaje de la RMS total.

En la Tabla 5 se muestran los valores de las potencias del sistema de alimentación y el consumo de cada elemento.

Tabla 5*Valores de las potencias*

Variable de las potencias	Lámpara incandescente	Lámpara ahorradora	Lámpara led
P (W)	10,240	11,100	9,767
Q (VAR)	89,430	14,200	3,341
S (VA)	10,24	19,10	10,32

2.2 Medición de contaminación eléctrica

El aspecto fundamental de la calidad de la energía y la eficiencia energética es estudiar los fenómenos que provoca la energía de distorsión por componentes no lineales. Las lámparas incandescentes son consideradas cargas lineales como se observa en la Figura 4. Su forma de onda es sinusoidal, no presenta distorsión alguna. Las lámparas ahorradoras consumen menos energía y el calor que disipan al medio ambiente es prácticamente despreciable; utilizan un 80 % menos de energía y reducen con esto la energía producida. Además, son consideradas cargas no lineales, al ser controladas por una tarjeta electrónica generadora de distorsión de corriente como se observa en la Figura 5. Por otro lado, las lámparas led son diodos compuestos por superposición de varias capas de material semiconductor que emite luz en una o más longitudes de onda (colores). Cuando es polarizado correctamente, esta lámpara presenta una gran eficiencia luminosa, pero la distorsión armónica es mayor, tal como se observa en la Figura 6. Las siguientes figuras se obtuvieron con el analizador de calidad de energía ENA-touch. Este es un *software* con salida gráfica que modifica la salida con estándares internacionales de la IEC y EN, que da la medición pico de tensión y corriente de línea.

Figura 4

Onda de consumo de tensión y corriente

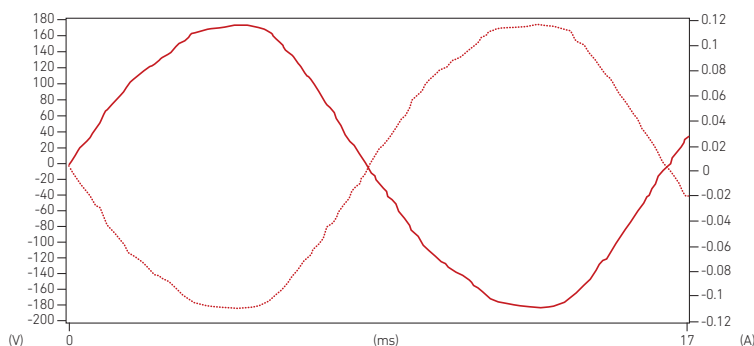


Figura 5

Onda de tensión y corriente correspondiente a lámpara ahorradora

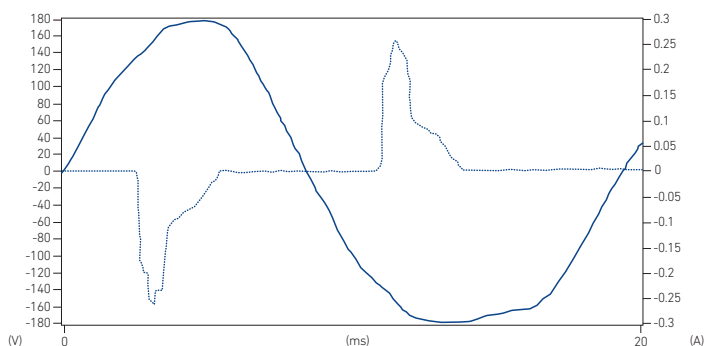
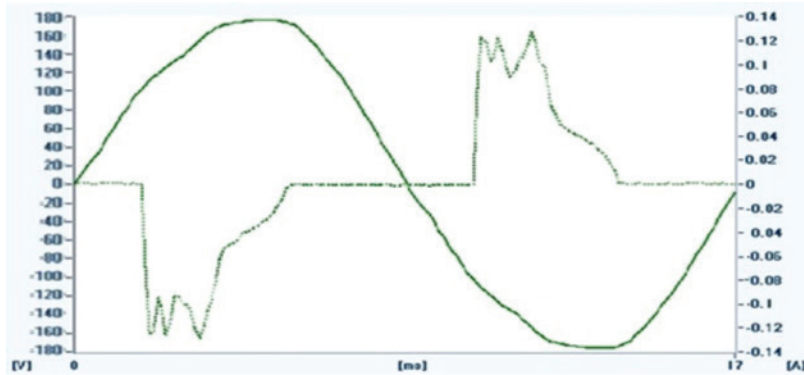


Figura 6

Onda de tensión y corriente correspondiente a lámpara led



Los niveles de distorsión de corriente se pueden caracterizar por un valor THD. Una pequeña corriente puede tener una alta distorsión armónica total. Incluso, algunos estudios han intentado evitar esta dificultad refiriendo al THD como componente fundamental de la corriente de carga máxima, en lugar de la fundamental de la presente muestra. A esto se le llama distorsión total de la demanda (TTD) y sirve como base de las directrices de la norma IEEE Std 519-2014, prácticas y requisitos recomendados para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica.

2.3 Comparación de distorsión eléctrica

Al realizar una comparación de los tres elementos, se observa la distorsión en el tiempo que sufre la señal de las lámparas ahorradoras y led, así como la amplitud pico y su distorsión de onda.

Figura 7

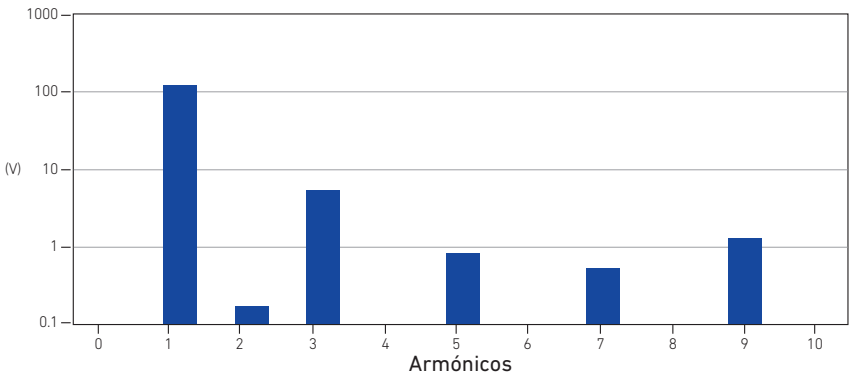
Ondas de corriente para los tres componentes en estudio



2.4 Medición de armónicos de voltaje y corriente

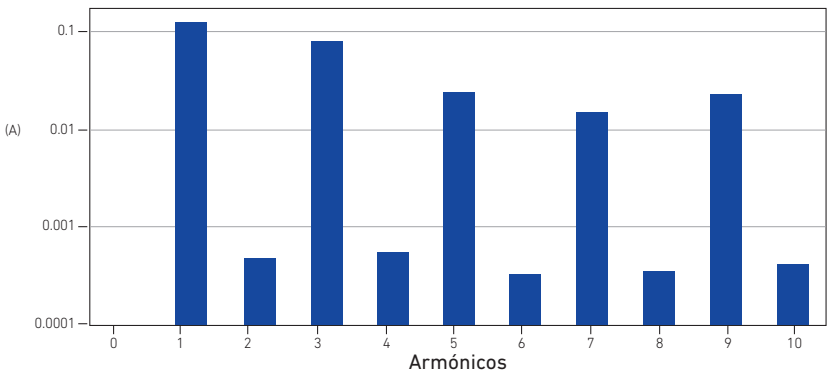
En la Figura 8 se presenta la medición de armónicos de tensión. En esta figura observamos que existen armónicos, pero son muy pequeños, por lo que no presentan problema alguno en la operación o en el funcionamiento de algún componente electrónico.

Figura 8
Armónicos de tensión



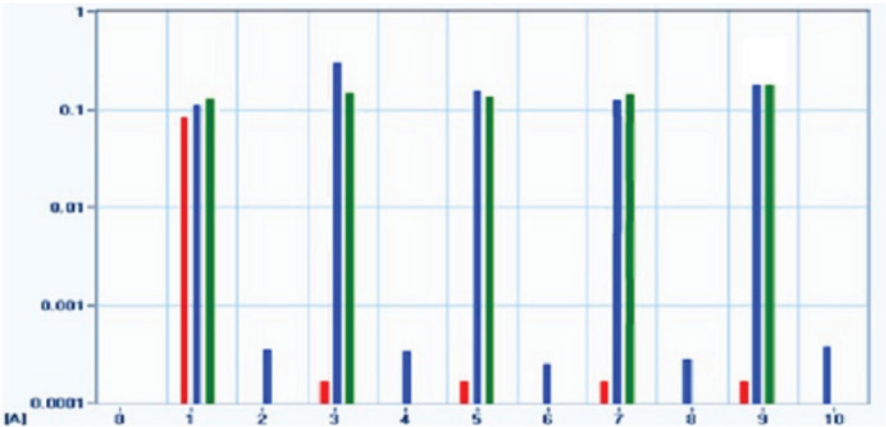
En la Figura 9 se observan los armónicos de corriente. Estos armónicos son los que predominan por su amplitud. Tienen una frecuencia en sus múltiplos 2, 3, 4, 5, ... n de la frecuencia fundamental de 60 Hz, con lo cual se miden los armónicos pares e impares. Para este caso, los dos son perjudiciales. Solo se midieron los primeros diez armónicos, ya que en los restantes su valor es mínimo, considerados menores a 0,1. Ocurre un fenómeno de contaminación del neutro, el cual es mucho mayor que en la línea.

Figura 9
Armónicos de corriente



Los resultados de la contaminación armónica se observan en la Tabla 6. En este se presentan los armónicos, mientras que su visualización gráfica se presenta en la Figura 10. Para los elementos estudiados solo existe contaminación armónica de corriente.

Figura 10
Armónicos de corriente



Se realizó una medición del espectro con aplicación de una cámara termográfica de marca Flirt Ti-440 para captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético que emite el cobre. Para ello, se aplica una emisividad de 0,64, lo que da por resultado lo mostrado en las figuras 11 y 12. La temperatura después de un tiempo de operación de las lámparas fue de 1,7 °C en el neutro, lo que nos permite observar que por efectos de la contaminación eléctrica la temperatura cambia.

Figura 11
Temperatura del conductor neutro

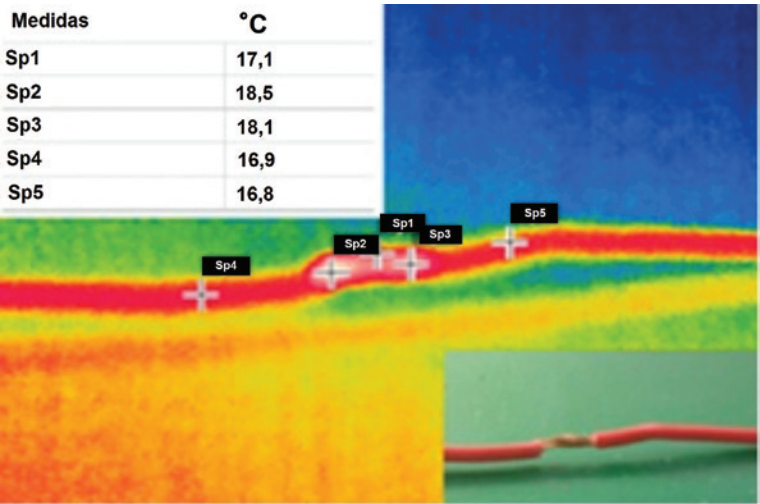


Figura 12

Temperatura de la línea de alimentación

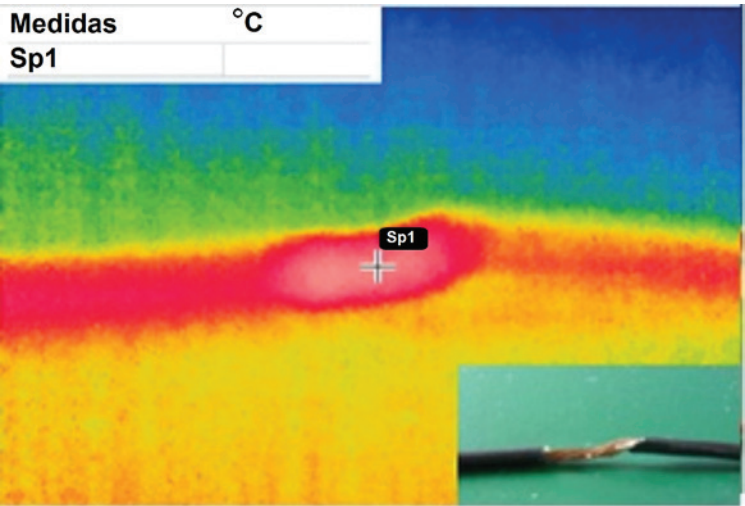


Tabla 6

Armónicos presentes en los elementos de estudio

Armónico	Lámpara incandescente	Lámpara ahorradora	Lámpara led
H1	0,000	0,155	0,178
H3	0,000	0,610	0,230
H5	0,000	0,230	0,210
H7	0,000	0,170	0,190
H9	0,000	0,540	0,540

2.5 Cálculo de filtro para eliminación de armónicos

El diseño del filtro, como parte de la solución propuesta, es un filtro pasa alto de segundo orden RLC. Este filtro corta las frecuencias bajas distintas en un punto de corte, solo permite el paso de frecuencias altas y atenúa las frecuencias bajas. Su forma de construcción no es compleja, pues consta de una resistencia, un inductor y un capacitor del tipo cerámico. Estos tres elementos son considerados pasivos. Para su cálculo, se parte de dar solución a las ecuaciones siguientes:

$$C = \frac{1}{2\pi k f_c Q R} \quad (4)$$

$$L = \frac{Q R}{2\pi k f_c} \quad (5)$$

Donde:

f_c = Frecuencia de corte (kHz)

Q = Factor de calidad

k = Constante = 1

C = Capacitancia (nF)

L = Inductancia (mH)

Para la aplicación de las ecuaciones, el cálculo de la reactancia del filtro para conocer en qué momento entra en resonancia, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

El diseño del filtro se llevó a cabo al obtener las reactancias X_C y X_L .

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{126^2}{14,20} = 1118 \Omega$$

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{1118}{3^2} = 124,22 \Omega$$

$$C_F = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 1118} = 2,37 \times 10^{-6} F$$

$$L_F = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{124,22}{2\pi \times 60} = 0,329 H$$

$$X_0 = \sqrt{\frac{0,329}{2,37 \times 10^{-6}}} = 372,58 \Omega$$

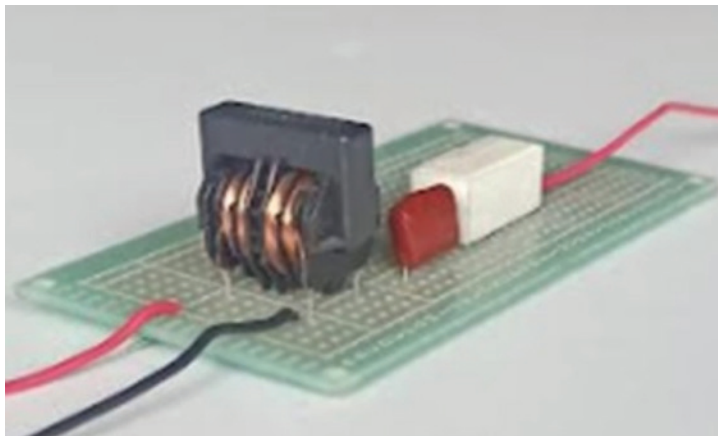
$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{372,58}{1000} = 0,37258 \Omega$$

El filtro queda de la siguiente forma: con una resistencia de 10 W a 1k (véase la Figura 13). Este filtro se conectó en paralelo con las líneas de alimentación, con lo cual

se provoca una impedancia baja, como el filtro que se calculó para disminuir el tercer armónico ($n = 3$).

Figura 13

Filtro propuesto



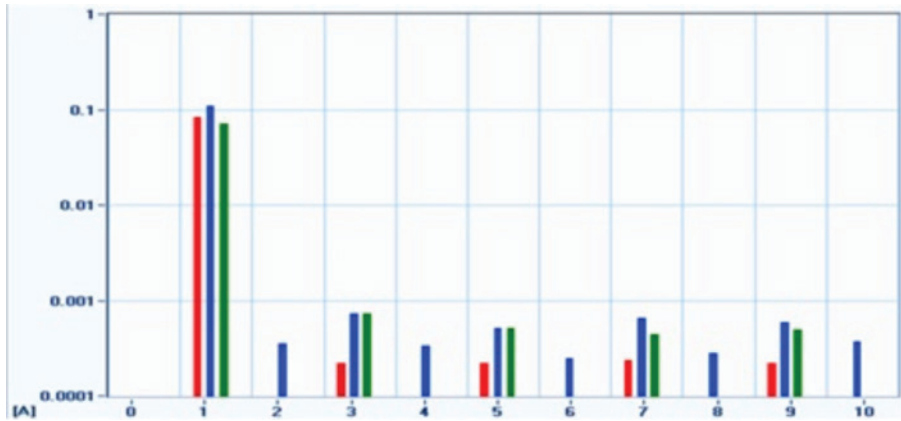
Para la aplicación del filtro, se toma como parámetro el tercer armónico, por ser el de mayor rango.

3. RESULTADOS

La medición de contaminación armónica en lámparas de iluminación juega un papel importante, debido a que es indispensable contribuir y minimizar los riesgos producidos al creciente aumento de corrientes contaminantes.

Los resultados muestran que existe contaminación en las lámparas de iluminación ahorradora y led. El sistema de alimentación estudiado se basa en el análisis de los armónicos de corriente, debido a que los armónicos de tensión son mínimos, mientras que los valores de contaminación armónica de corriente son considerados altos por estar al 80 % de la fundamental para el tercer armónico, para el quinto armónico en 40 %, el séptimo al 30 % y el noveno al 40 %. Con estos datos se calculó el filtro.

Con la aplicación del filtro calculado mostrado en la Figura 13, se observa que sí existe un cambio en el comportamiento de la distorsión armónica, el cual queda como se observa en la Figura 14. La sintonización del filtro en el tercer armónico ocasiona que la corriente armónica cambie en dirección, por lo que es forzada a viajar por el filtro en sentido a tierra y no de regreso al neutro. Esto mismo ocurre con los armónicos quinto, séptimo y noveno, por lo que se observa una disminución considerable. La distorsión total armónica o THD disminuye en forma general y toma el valor del 6 %.

Figura 14*Armónicos de corriente con aplicación del filtro*

4. DISCUSIÓN

La mayoría de los equipos son capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias. Sin embargo, en los últimos diez años, se ha agregado al sistema eléctrico un elevado número de equipos, no tan tolerantes a estas variaciones, que incluye a los controladores electrónicos y a todos los equipos con aplicación de la electrónica (Hernández Corona et al., 2016, p. 34).

Con la aplicación de controles complejos, se desarrolló un control de procesos mucho más preciso y un sistema de protección mucho más sensible, lo que hace a estos aún más susceptibles a los efectos de los disturbios en el sistema eléctrico (Hernández Corona et al., 2016, p. 34).

El desarrollo de investigaciones relacionadas con el creciente número de cargas no lineales, utilizando nuevas tecnologías electrónicas, está aumentando debido a la aparición de perturbaciones eléctricas que causan problemas de generación de armónicos en los sistemas de energía. En los sistemas de distribución de energía eléctrica de México, las cargas no lineales conectadas a la red han aumentado drásticamente y han afectado significativamente la compatibilidad electromagnética de la red, por lo que es necesario iniciar estudios para determinar el comportamiento de estas perturbaciones en la medida que afectan a las empresas de servicios públicos y a los consumidores (Hernández Corona et al., 2016).

Las lámparas de bajo consumo cambian la naturaleza de onda sinusoidal de la corriente de suministro, lo que produce corrientes armónicas. Estas corrientes armónicas ingresan al sistema de distribución de energía, lo que puede causar interferencias en los circuitos de comunicación y otros equipos electrónicos importantes. Estas

perturbaciones también pueden ocurrir en casa con mayor o menor frecuencia (Vásquez Teneda et al., 2022).

En las instalaciones eléctricas se suele detectar cierta distorsión de la señal de alimentación de voltaje o corriente que, cuando es baja, no provoca problemas en el funcionamiento de los equipos e instalaciones. Existen normas que definen los límites permisibles de distorsión en función del voltaje de operación y su efecto en el sistema eléctrico (Martínez-Morales et al., 2019). Cada día es mayor la detección de la presencia de perturbaciones en dispositivos eléctricos de la red eléctrica y de su impacto en el funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos individuales, así como en su funcionamiento y protección por su sensibilidad. Esto lleva a proponer una política sancionadora para los próximos años.

5. CONCLUSIÓN

La aplicación del método experimental para la evaluación de las características de distorsión de onda de tensión armónica y corriente permitió la determinación de las características inherentes a la calidad de la energía. De esta se obtuvo que la lámpara led es la que contamina más. Este método, utilizado como herramienta para proteger a las instalaciones, elevar su vida útil y determinar el ahorro de energía, se irá incrementando en los próximos años. Asimismo, en los sistemas monofásicos, que por el impacto tecnológico son de gran importancia y por la generación de ondas distorsionadas o contaminación eléctrica, se requiere especial atención, así como del desarrollo de medidas tendientes para minimizar sus efectos.

Al desarrollar esta investigación se obtuvo resultados satisfactorios al determinar los armónicos y su respectiva amplitud de los elementos de estudio. Se determinó que la lámpara que más contamina es la lámpara led, cuya repercusión dependerá de la potencia de su consumo.

6. REFERENCIAS

- Amaya-Vásquez, L., & Inga-Ortega, E. (2022). Localización de distorsiones armónicas en sistemas eléctricos usando sensado comprimido. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-30332022000100032&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Andreassen, O. Ø., Rijllart, A., Mätäsaho, I., & Arnaudon, L. (2014). Alcance FFT de bajo costo utilizando LABVIEW, CRIO y FPGA. En C. Marshall, J. Fisher & V. R. W. Schaa (Eds.), *Actas del 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems*. ICALEPCS 2013 (801-804). JACoW.

- Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). *Power system harmonics* (2.ª ed.). John Wiley & Sons. <http://files.hostgator.co.in/hostgator253199/file/powersystemharmonics2nded.-arrillagawatson.pdf>
- Barajas, M., & Bañuelos-Sánchez, P. (2010). Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 11(2), 189-198. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2010.11n2.016>
- Benachaiba, C., & Ferdi, B. (2007). Un estudio comparativo de las normas IEC 61000 parte 3-2 y 3-4 e IEEE 519-1992 en aplicaciones de baja tensión. *Revisión Internacional de Ingeniería Eléctrica*, 2(6), 771-776.
- Brady, H. (2017, 28 de noviembre). Las luces led incrementan la contaminación lumínica. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/11/las-luces-led-incrementan-la-contaminacion-luminica>
- Chacón García, A., & Ruiz Moreno, C. J. (2008). Medición de armónicos en un sistema monofásico: diseño e implementación de un prototipo. *Visión electrónica*, 2(2), 64-77.
- El Mofty, A., & Youssef, K. (2001, 18-21 de junio). *Industrial power quality problems* [Sesión de conferencia]. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED, Amsterdam, Netherlands. <https://doi.org/10.1049/cp:20010757>
- Erazo Ávila, L. A., & Guamán Segarra, J. C. (2022). Analysis of energy efficiency in low voltage distribution systems through the reduction of harmonics. *Sapienza. International Journals of Interdisciplinary Studies*, 3(6), 154-163. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.505>
- Esparza González, M. S., Mata Guerrero, J. A., & Castañeda Ramos, L. A. (2006). Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones. *Conciencia tecnológica*, (32).
- Hernández Corona, J. L., Albores Velazco, F. J., Carrasco Aguilar, M. A., & González Contreras, B. M., & Portilla Flores, A. (2016). Determinación del flujo armónico en conductores de alimentación. *Revista Iztal Computación*, 5(10), 33-40.
- Hernández Ochoa, C. E. (2018). *Reforma energética-electricidad*. Fondo de Cultura Económica.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. En *IEEE Std 519-2014* (pp. 1-29). IEEE Xplore.
- Llamas Terrés, A., Acevedo, S., De los Reyes, J., & Baez J. (2014). *Armónicas en sistemas eléctricos industriales*. Innovación Editorial Lagares de México.

- Martínez-Morales, S., Sellschopp-Sánchez, F. S., Loera-Palomo, R., Rivero-Corona, M. A., & Vargas-Salas. (2019). Estudio de resonancias armónicas en red eléctrica ante variación de carga. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec. Lerdo*, 1(5), 127-132.
- Mora-Barajas, M. A., & Bañuelos-Sánchez, P. (2010). Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 11(2), 189-198.
- O'Reilly, K. J. (2020). *Medida y análisis de la distorsión armónica en cargas no lineales aisladas y combinadas en los rangos 0-2 kHz y 2-9 kHz* [Tesis de maestría, Universidad de Cantabria]. UCrea. Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/20263>
- Palacios, J. (2020). Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión. *I+D Tecnológico*, 16(2), 78-85. <https://doi.org/10.33412/idt.v16.2.2835>
- Pérez, Á. A., Bravo de Medina, N., & Llorente Antón, M. (1999). La amenaza de los armónicos y sus soluciones. *Centro Español de Información del Cobre*.
- Petit Suárez, J. F., Ordóñez Plata, G., & Ustariz Farfán, A. (2003). Análisis general de armónicos en sistemas eléctricos monofásicos: una revisión a las definiciones de la potencia. *Símpoio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica*, 2. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/SICEL/article/view/391>
- Ramírez, E. T. (2008). Harmonic distortion. *AGN Group. AP&C*. <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>
- Rojas, H. E., Rivas, E., & Jaramillo, A. A. (2014). Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos. *Ingeniería*, 19(2), 129-146.
- Ruggero, B., & Sánchez, M. E. (2014). Incidencias de cargas no lineales en transformadores de distribución. *Revista Científica de la UCSA*, 1(1), 33-51.
- Vásquez Teneda, F. H., Vásquez Barba, D. B., & Urresty-Noguera, Y. U. (2022). Caracterización de la calidad de energía en focos incandescentes, fluorescentes, inducción y LED. *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas*, 6(2), 117-133. <http://investigacion.utc.edu.ec/revistasutc/index.php/ciya/article/view/444/455>
- Viego Felipe, P. R., Gómez Sarduy, J. R., De Armas Teyra, M. A., & Sousa Santos, V. (2014). Efecto de los armónicos en los motores monofásicos asíncronos con capacitor de marcha. *Ingeniería Energética*, 35(1), 27-37.
- Yebra Morón, J. A. (2021). *Sistemas eléctricos de distribución*. Editorial Reverté.