

Evaluación del comportamiento eléctrico en luminarias led bajo regímenes de operación continua y cíclica

Evaluation of the Electrical Performance of LED Luminaires Under Continuous and Cyclic Operating Regimes

Mauricio Fabián Rosero Yugsi, Alexis Geovanny Taco Cabrera, Rubén Darío Tirira Chulde, Marco Paúl Defas Pichucho

¹ Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador. Email: mrosero@tecnologicosucre.edu.ec

² Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador. Email: ataco@tecnologicosucre.edu.ec

³ Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador. Email: marcodefas@gmail.com

⁴ Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Pichincha, Ecuador. Email: marcodefas@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.61236/ciya.v10i1.1234>

Recibido: 14 de septiembre de 2025 • Revisión aceptada: 22 de noviembre de 2025.

Resumen

Este estudio caracteriza el comportamiento eléctrico de dos modelos de luminarias LED sometidas a regímenes de operación continua y cíclica en condiciones controladas de laboratorio. Las mediciones se realizaron durante intervalos de 24 horas utilizando un analizador de calidad de energía de clase A configurado conforme a las normas IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-15 e IEC 61000-4-7. Se evaluaron los parámetros THDv, contenido del tercer armónico y flicker de largo plazo, comparando su evolución bajo cuatro patrones operativos. Los resultados muestran que la luminaria tubular multipanel mantiene un desempeño estable en todos los regímenes, con índices de flicker dentro de los límites normativos y variaciones armónicas moderadas. En contraste, la luminaria compacta de alta potencia presenta una mayor sensibilidad térmica y eléctrica durante la operación continua y en ciclos prolongados, con incremento significativo de Plt y de los armónicos de baja frecuencia. No obstante, su estabilidad mejora en regímenes de mayor frecuencia de conmutación. Los hallazgos evidencian que la arquitectura del driver es un factor determinante en la compatibilidad electromagnética y en la estabilidad operativa de sistemas de iluminación LED, destacando la necesidad de integrar criterios de calidad de energía en la selección de luminarias para aplicaciones residenciales y comerciales.

Palabras claves: Calidad de la energía; Luminarias LED; Armónicos eléctricos; Flicker; Compatibilidad electromagnética; Conversión de potencia.

Abstract

This study characterizes the electrical behavior of two LED luminaire models operating under continuous and cyclic regimes in controlled laboratory conditions. Measurements were carried out over 24-hour intervals using a Class A power quality analyzer configured in accordance with IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-15, and IEC 61000-4-7 standards. Total harmonic distortion, third-harmonic content, and long-term flicker were evaluated and compared across four operating patterns. Results show that the multipanel tubular luminaire maintains stable performance across all regimes, with flicker indices within normative limits and moderate harmonic variations. Conversely, the high-power compact luminaire exhibits greater thermal and electrical sensitivity during continuous operation and long duty cycles, with significant increases in Plt and low-order harmonics. However, its stability improves under higher switching-frequency regimes. Findings demonstrate that driver architecture is a determining factor in electromagnetic compatibility and operational stability of LED lighting systems, highlighting the importance of integrating power quality criteria into luminaire selection for residential and commercial applications.

Keywords: Power quality; LED luminaires; Electrical harmonics; Flicker; Electromagnetic compatibility; Power conversion.

1. INTRODUCCIÓN

La adopción de luminarias basadas en diodos emisores de luz ha transformado la operación de los sistemas de iluminación en redes de baja tensión, principalmente debido a su elevada eficiencia energética, estabilidad operativa y reducción del consumo [1]. Este avance ha impulsado su uso masivo en entornos residenciales y comerciales y, al mismo tiempo, ha evidenciado la necesidad de analizar rigurosamente su interacción con el suministro eléctrico. La integración de convertidores electrónicos introduce comportamientos no lineales capaces de influir en la calidad de la energía, generando variaciones de tensión, distorsiones armónicas y fluctuaciones asociadas al flicker. Estos parámetros permiten caracterizar con precisión la respuesta eléctrica del sistema y facilitan evaluar cómo los regímenes de operación continua y cíclica modifican el comportamiento dinámico de las luminarias LED.

La calidad de la energía desempeña un papel fundamental en la operación segura y eficiente de los sistemas eléctricos, ya que determina la estabilidad de la tensión, la forma de onda y el grado de fluctuaciones que pueden afectar el funcionamiento de las cargas conectadas [2], [3]. La normativa internacional establece criterios técnicos para evaluar estos fenómenos. La EN 50160 define límites admisibles de distorsión armónica total de tensión, variaciones lentas y

flicker de larga duración en redes de distribución pública [4]. De forma complementaria, las normas IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15 e IEC 61000-4-30 especifican los métodos de medición para la caracterización de armónicos, fluctuaciones de tensión e índices de flicker mediante instrumentos de clase A [5]–[7].

En las luminarias LED, la interacción entre la electrónica interna y la red condiciona el comportamiento eléctrico bajo distintos regímenes de operación. Factores como la topología del driver, la etapa de rectificación, la estrategia de filtrado y la capacidad de compensación ante variaciones de tensión influyen directamente en los niveles de distorsión armónica y en la estabilidad del sistema [8]–[10]. Cuando estas luminarias se someten a ciclos repetitivos de encendido y apagado, el estado térmico del convertidor adquiere especial relevancia, debido a que la impedancia de los semiconductores y el rendimiento del filtrado pueden cambiar con la temperatura, modificando la forma de onda de corriente y tensión [11], [12].

El flicker eléctrico es uno de los parámetros más sensibles durante la operación dinámica de luminarias LED. Su magnitud depende tanto de las variaciones instantáneas de tensión como de la capacidad del driver para amortiguar o amplificar dichas fluctuaciones. Estudios recientes muestran que luminarias con filtrado limitado o sin corrección activa del factor de potencia pueden

presentar incrementos del flicker a corto y largo plazo cuando operan bajo conmutación frecuente o en condiciones de tensión fluctuante [13], [14]. Asimismo, la conexión de múltiples luminarias en paralelo puede modificar la respuesta global del sistema debido a la interacción entre drivers y red, afectando los armónicos de orden bajo y la estabilidad de la tensión [15], [16].

En este contexto, evaluar la respuesta eléctrica de luminarias LED sometidas a regímenes continuos y cíclicos permite identificar cómo la electrónica de potencia reacciona frente a patrones operativos realistas, definidos por secuencias repetitivas de encendido y breves intervalos de apagado. El análisis de parámetros como la distorsión armónica total de tensión, el contenido del tercer armónico, el flicker de corto y largo plazo y la variación de la tensión eficaz proporciona información clave para comprender su comportamiento dinámico y establecer criterios que mejoren la compatibilidad electromagnética y la estabilidad del sistema. Estudios complementarios demuestran que la dinámica armónica y los efectos transitorios en redes con alta penetración de cargas LED pueden intensificarse dependiendo de la elasticidad de la red y la densidad de instalación [17].

El presente estudio se basa en mediciones experimentales realizadas con un analizador de calidad de energía de clase A, configurado conforme a las normas IEC aplicables. Su objetivo es caracterizar el comportamiento eléctrico de

luminarias LED bajo distintos regímenes de operación continua y cíclica, proporcionando una evaluación detallada de los parámetros asociados a la calidad de la energía y ofreciendo evidencia experimental útil para su análisis técnico en sistemas de iluminación conectados a redes de baja tensión.

2. METODOLOGÍA

2.1. Configuración experimental

El estudio se desarrolló mediante un enfoque experimental orientado a caracterizar el comportamiento eléctrico de luminarias LED sometidas a regímenes de operación continua y cíclica en condiciones de laboratorio controladas. La alimentación se estableció mediante un circuito monofásico fase-neutro con una tensión nominal de 127 V y una frecuencia de 60 Hz. Cada registro tuvo una duración de 24 horas, lo que permitió obtener las ventanas de análisis requeridas para el cálculo de los índices de flicker a corto y largo plazo establecidos por la IEC 61000-4-15 [6]. Las mediciones se realizaron con un analizador de calidad de energía Fluke 1775 de clase A, configurado conforme a los requisitos de exactitud y a los procedimientos de medición definidos en las normas IEC 61000-4-30 e IEC 61000-4-7 [5], [7], y siguiendo las recomendaciones técnicas del fabricante del instrumento [18].

Para cada condición evaluada se trabajó con dos modelos de luminarias LED de uso general: un

conjunto de seis unidades de tipo tubular multipanel y un conjunto de seis unidades de tipo compacto de alta potencia, ambos con potencia nominal de 80 W y conectados en paralelo dentro del mismo circuito de alimentación. Esta configuración se mantuvo constante en todos los ensayos, de manera que cada modelo fue evaluado de forma independiente bajo condiciones eléctricas idénticas. Las mediciones de 24 horas se efectuaron en cuatro regímenes operativos. El régimen continuo mantuvo las luminarias encendidas durante toda la medición, mientras que los regímenes cíclicos contemplaron intervalos de encendido de 60, 30 y 10 minutos, seguidos de un apagado de 2 segundos, repetidos de manera continua sin modificar la topología del circuito ni las condiciones de alimentación.

El analizador registró automáticamente los valores de flicker a corto plazo mediante ventanas de diez minutos y los valores de flicker a largo plazo mediante ventanas de dos horas, siguiendo los procedimientos establecidos por la IEC 61000-4-15 [6]. Para cada régimen operativo se obtuvieron registros independientes para las luminarias de tipo tubular multipanel y para las luminarias de tipo compacto de alta potencia, manteniendo la misma configuración eléctrica en todos los casos. También se registró la distorsión armónica total de tensión y el contenido del tercer armónico, conforme a la descomposición espectral definida por la IEC 61000-4-7 [5]. El procesamiento de los datos se

efectuó mediante el software Energy Analyze Plus sin aplicar filtrados adicionales, preservando la integridad de las señales de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del instrumento [18].

La selección instrumental, el periodo de registro y la estructura de medición aplicada en este estudio se alinean con prácticas estandarizadas para experimentación en sistemas con cargas electrónicas altamente sensibles a la calidad del suministro, lo que garantiza la trazabilidad y repetibilidad de los registros bajo condiciones reales de operación [19]. La configuración instrumental empleada en el analizador Fluke 1775 se presenta en la Tabla 1. Los parámetros incluidos corresponden al ajuste utilizado en todas las mediciones, conforme a las especificaciones del fabricante y a los requisitos normativos aplicables.

Tabla 1. Configuración del analizador de calidad de energía.

Parámetro	Valor
Tensión nominal	127 V
Frecuencia nominal	60 Hz
Modo de medición	Registrador CP
Topología	1F + N
Tipo de buffer	Lineal, sin sobrescribir

Parámetro	Valor
Intervalo de tendencia	5 min
Límite de caída	90 %
Límite de aumento	110 %
Límite RVC	5 %
Transitorios	120 V

Fuente. Configuración aplicada en todas las mediciones realizadas con el analizador Fluke 1775.

2.2. Condiciones de operación

Las condiciones operativas empleadas en el estudio se resumen en la Tabla 2, donde se presenta la secuencia de encendido y apagado aplicada en cada uno de los regímenes evaluados. Esta tabla permite contextualizar las diferencias entre los patrones de funcionamiento antes de exponer los resultados.

Tabla 2. Condiciones de operación evaluadas.

Régimen operativo	Descripción
Continuo	Encendido permanente (24 h)
Cíclico 60 min	60 min encendido, 2 s apagado

Régimen operativo	Descripción
Cíclico 30 min	30 min encendido, 2 s apagado
Cíclico 10 min	10 min encendido, 2 s apagado

Fuente. Elaboración propia con datos programados para LED y CFL.

La metodología aplicada permitió obtener registros homogéneos y comparables bajo condiciones controladas, garantizando que las diferencias observadas entre los regímenes continuos y cíclicos fueran atribuibles exclusivamente a los patrones de conmutación y no a variaciones instrumentales o ambientales. Este planteamiento es coherente con metodologías empleadas en estudios previos sobre calidad de la energía en luminarias basadas en electrónica de potencia [11], [12], [15], [16].

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados se presentan en función de los distintos regímenes de operación aplicados a cada tecnología, con el propósito de analizar el comportamiento de los indicadores de calidad de energía: distorsión armónica total de tensión THDv, componente armónico de tercer orden h_3 , índice de flicker de largo plazo Plt y número de eventos registrados. Los valores reportados

corresponden a los promedios medidos durante las 24 horas de ensayo para cada tipo de lámpara.

3.1 Desempeño eléctrico en régimen de operación continua

Antes de analizar los regímenes cíclicos, es necesario establecer el comportamiento de las luminarias bajo operación continua. La Tabla 3 presenta los valores promedio de THD_v, h₃ y Plt obtenidos durante un registro completo de 24 horas para la luminaria tubular multipanel y la luminaria compacta de alta potencia.

Tabla 3. Parámetros eléctricos promedios en operación continua

Luminaria	THD _v (%)	h ₃ (%)	Plt	Cumplimiento EN 50160
Compacta de alta potencia	5,09	4,06	1,74	No cumple
Tubular multipanel	3,93	3,15	0,36	Cumple

Fuente. Elaboración propia a partir de valores promedios obtenidos durante 24 horas de medición.

Los valores obtenidos muestran un contraste marcado entre ambas tecnologías. La luminaria compacta de alta potencia presenta un índice de parpadeo significativamente superior al límite

normativo establecido por la EN 50160 [4], lo que evidencia una menor capacidad de regulación interna bajo operación sostenida. En cambio, la luminaria tubular multipanel mantiene una respuesta estable en los tres parámetros evaluados, lo que sugiere un diseño de convertidor con mayor capacidad de compensación frente a variaciones térmicas acumulativas.

Para facilitar la representación gráfica y la comparación entre luminarias, se emplean las abreviaciones LED-A para la luminaria tubular multipanel y LED-B para la luminaria compacta de alta potencia. La Figura 1 presenta un diagrama tipo radar que resume los valores de THD_v, h₃ y Plt mostrados en la Tabla 3, permitiendo visualizar de forma conjunta el comportamiento relativo de ambas tecnologías bajo operación continua.

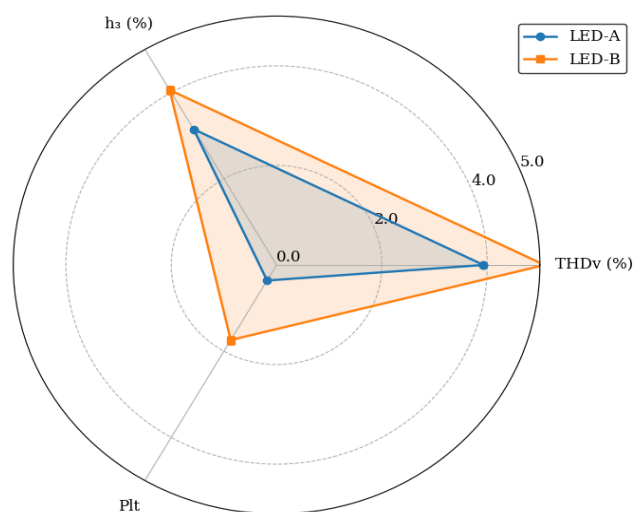


Figura 1. Comparación de parámetros eléctricos en operación continua.

La Figura 1 muestra que LED-A mantiene valores más bajos y uniformes en los tres parámetros evaluados, lo que indica una mayor estabilidad del driver bajo operación continua. Por el contrario, LED-B presenta incrementos notorios en THD_v, h₃ y, especialmente, en Plt, lo que evidencia una mayor sensibilidad de su electrónica ante fluctuaciones de tensión y efectos térmicos acumulativos. Esta diferencia sugiere que LED-A dispone de un sistema de filtrado y compensación más robusto, mientras que LED-B presenta limitaciones para mantener la estabilidad en condiciones prolongadas de funcionamiento.

3.2 Régimen cíclico de 60 min encendido / 2 s apagado

El primer régimen cíclico corresponde a una condición en la que la luminaria permanece encendida durante intervalos prolongados antes de cada interrupción breve. La Tabla 4 presenta los valores obtenidos para este escenario.

Tabla 4. Parámetros eléctricos en régimen cíclico de 60 min.

Luminaria	THD _v (%)	h ₃ (%)	Plt	Cumplimiento EN 50160
Compacta de alta potencia	6,09	5,15	3,26	No cumple

Luminaria	THD _v (%)	h ₃ (%)	Plt	Cumplimiento EN 50160
Tubular multipanel	5,36	4,59	0,90	Cumple

Fuente. Elaboración propia a partir de valores obtenidos durante 24 horas de medición en régimen cíclico.

En comparación con la operación continua, ambos modelos presentan un aumento en la distorsión armónica, aunque este incremento es más pronunciado en la luminaria compacta de alta potencia. En este modelo, el valor de Plt supera ampliamente el límite de 1,0, lo que confirma su sensibilidad a los transitorios asociados al encendido. La luminaria tubular multipanel mantiene todos los parámetros dentro de los rangos normativos, lo que evidencia una respuesta estable incluso en ciclos prolongados de operación.

La Figura 2 sintetiza los valores de THD_v, h₃ y Plt correspondientes al régimen de 60 minutos para LED-A y LED-B con base en la Tabla 4. La inclusión de una línea punteada permite visualizar la diferencia absoluta entre ambas luminarias y facilita identificar el parámetro en el que se concentra la mayor divergencia.

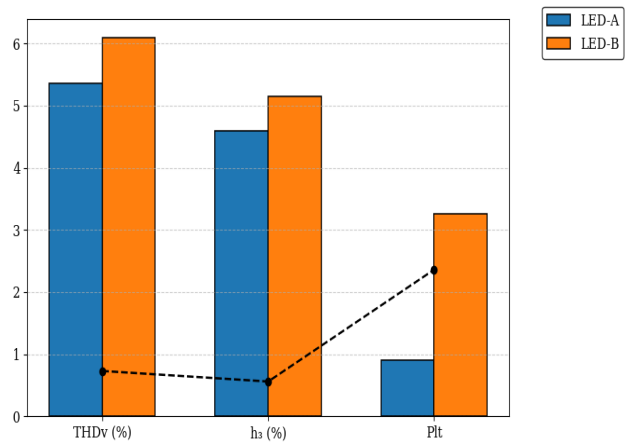


Figura 2. Comparación de parámetros en régimen de 60 min

La Figura 2 muestra que LED-B presenta valores superiores de THDv, h_3 y Plt respecto de LED-A, lo que confirma una mayor sensibilidad de su electrónica frente al régimen cíclico de 60 minutos. La línea punteada destaca la diferencia absoluta entre ambas luminarias y permite identificar con claridad el parámetro en el que se concentra la mayor divergencia, que en este caso corresponde a Plt. Las diferencias en THDv y h_3 son menores en comparación, lo que refuerza la estabilidad eléctrica mostrada por LED-A bajo condiciones de conmutación prolongada.

3.3 Régimen cíclico de 30 min encendido / 2 s apagado

Este régimen introduce una frecuencia de conmutación mayor que la del caso anterior, lo que reduce los efectos acumulativos del calentamiento interno. Los valores correspondientes se presentan en la Tabla 5. Trabajos técnicos especializados en

modelado espectral de cargas no lineales han demostrado que la medición prolongada bajo ventanas temporales normalizadas mejora la representación estadística del comportamiento armónico en luminarias de estado sólido, especialmente en estudios comparativos entre arquitecturas electrónicas distintas [20].

Tabla 5. Parámetros eléctricos en régimen de 30 min.

Luminaria	THD _v (%)	h ₃ (%)	Plt	Cumplimiento EN 50160
Compacta de alta potencia	5,99	4,97	0,46	Cumple
Tubular multipanel	5,54	4,90	0,69	Cumple

Fuente. Elaboración propia a partir de valores obtenidos conforme a los procedimientos de medición establecidos.

La Tabla 5 evidencia que el número de eventos continúa creciendo con la reducción del tiempo de encendido, especialmente en las LED, que alcanzan 194 eventos. Sin embargo, el flicker disminuye en ambas tecnologías y se mantiene dentro de los límites aceptables, con valores de Plt inferiores a 0,5. Los valores de THDv permanecen por debajo del ocho por ciento en ambos casos,

aunque las LED mantienen niveles de distorsión armónica ligeramente superiores a los de las CFL. Esto sugiere que la reducción del tiempo de encendido atenúa el efecto de parpadeo, pero no elimina la naturaleza más no lineal de las LED.

Los resultados muestran una mejora notable en ambas luminarias. En ambos casos, el índice de parpadeo se mantiene dentro del límite normativo, lo que refleja una mayor estabilidad del driver bajo una conmutación de frecuencia moderada. La luminaria tubular multipanel mantiene valores armónicos ligeramente inferiores, aunque la diferencia respecto al modelo compacto se reduce en comparación con el régimen de 60 minutos.

Para evaluar la variación del comportamiento eléctrico en el régimen de 30 minutos encendido y 2 segundos apagado, se utiliza una representación normalizada que compara los valores de THDv, h_3 y Plt con respecto a los obtenidos en el régimen de 60 minutos. Esta aproximación permite identificar las modificaciones relativas entre ambos escenarios. La Figura 3 emplea las abreviaciones LED-A y LED-B en correspondencia con las luminarias evaluadas.

La razón normalizada se obtiene dividiendo los valores de THDv, h_3 y Plt del régimen de 30 minutos entre los valores correspondientes del régimen de 60 minutos. El resultado, expresado como una magnitud adimensional, permite evaluar

el cambio relativo entre ambas condiciones. La Figura 3 presenta estas razones mediante barras agrupadas e incorpora una línea punteada que indica el promedio de ambas luminarias para cada parámetro.

Tabla 6. Razones normalizadas 30/60 para cada parámetro.

Parámetro	LED-A 30/60	LED-B 30/60
THDv	1,03	0,98
h_3	1,07	0,96
Plt	0,77	0,14

Fuente. Elaboración propia a partir de razones normalizadas calculadas a partir de los valores de las Tablas 4 y 5.

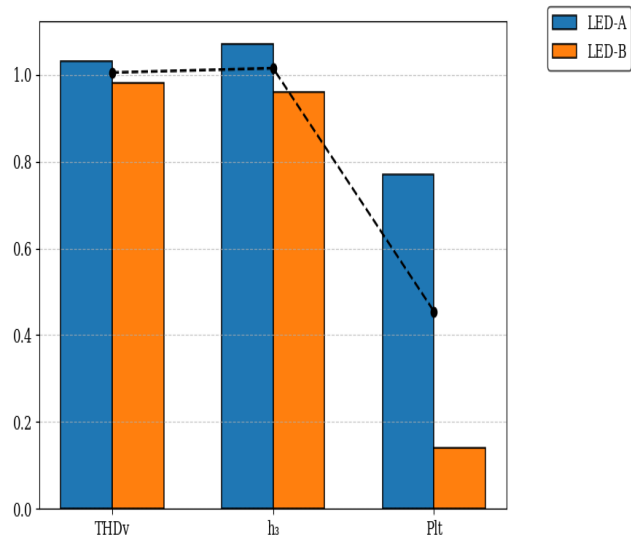


Figura 3. Relación normalizada 30/60 de parámetros eléctricos.

La Figura 3 permite identificar con claridad las variaciones relativas entre ambos regímenes. Los resultados muestran que la respuesta de cada luminaria no es uniforme para todos los parámetros, lo que evidencia diferencias en la estabilidad armónica y en la sensibilidad del driver ante un aumento de la frecuencia de conmutación.

3.4 Régimen cíclico de 10 min encendido / 2 s apagado

El régimen con mayor frecuencia de conmutación permite evaluar la estabilidad de las luminarias bajo activaciones repetitivas. La Tabla 7 presenta los valores obtenidos para este escenario.

Tabla 7. Parámetros eléctricos en régimen de 10 min.

Luminaria	THD _v (%)	h ₃ (%)	Plt	Cumplimiento EN 50160
Compacta de alta potencia	6,11	5,17	0,54	Cumple
Tubular multipanel	5,40	4,78	0,64	Cumple

Fuente. Elaboración propia a partir de valores obtenidos durante 24 horas de medición en el régimen cíclico de 10 minutos.

Ambos modelos mantienen el cumplimiento normativo en este régimen. Aunque la luminaria compacta de alta potencia presenta un ligero incremento en el valor de THD_v respecto al régimen de 30 minutos, su índice de parpadeo permanece dentro del límite permitido. La luminaria tubular multipanel conserva un comportamiento más uniforme, con diferencias reducidas entre los parámetros evaluados. La Figura 4 compara los valores de THD_v, h₃ y Plt para LED-A y LED-B en el régimen cíclico de 10 minutos.

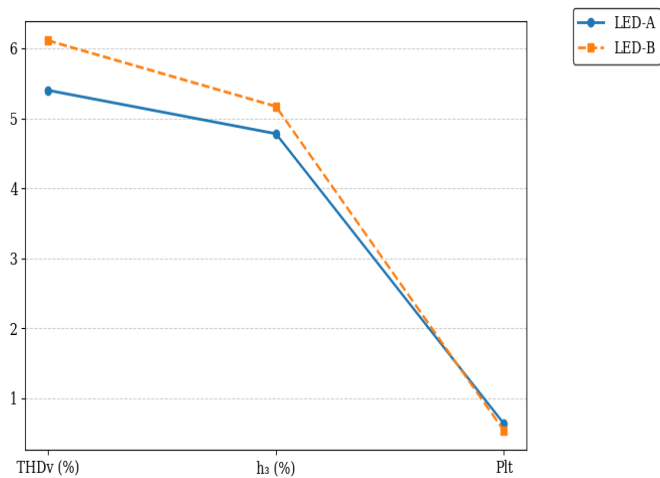


Figura 4. Comparación de parámetros en régimen de 10 min.

La Figura 4 muestra que LED-B mantiene valores superiores de THDv y h_3 respecto de LED-A en el régimen de 10 minutos, lo que indica una mayor sensibilidad frente a las variaciones de tensión incluso bajo una conmutación frecuente. En contraste, el valor de Plt es menor en LED-B, lo que evidencia una disminución de la severidad del parpadeo respecto a LED-A. En conjunto, estos resultados sugieren que, si bien el régimen de 10 minutos reduce los efectos acumulativos del calentamiento en el driver compacto, su respuesta armónica continúa siendo más elevada, mientras que LED-A mantiene un comportamiento más equilibrado entre armónicos y flicker.

3.5 Comparación global entre regímenes operativos

Con el propósito de identificar tendencias transversales en todos los escenarios evaluados, la Tabla 8 consolida los valores promedios obtenidos para ambas luminarias LED en los cuatro regímenes de operación.

Tabla 8. Resumen global de parámetros eléctricos.

Régimen	THD _v (%) Tubular	THD _v (%) Compacta	h ₃ (%) Tubular	h ₃ (%) Compacta	Plt Tubular	Plt Compacta
Continuo	3,93	5,09	3,15	4,06	0,36	1,74
60 min	5,36	6,09	4,59	5,15	0,90	3,26
30 min	5,54	5,99	4,90	4,97	0,69	0,46
10 min	5,40	6,11	4,78	5,17	1,64	0,54

El análisis integrado confirma que la luminaria tubular multipanel presenta el perfil más estable en todos los regímenes evaluados, tanto en operación continua como en condiciones cíclicas. En contraste, la luminaria compacta de alta potencia

muestra una mayor sensibilidad al parpadeo en operación continua y en ciclos prolongados, aunque estabiliza su comportamiento en regímenes de conmutación más frecuentes.

La Figura 5 muestra la evolución conjunta de los parámetros THDv, h_3 y Plt en los cuatro regímenes operativos, de acuerdo con los valores consolidados en la Tabla 8.

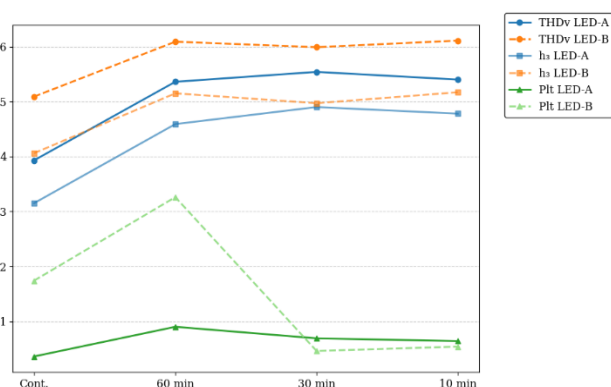


Figura 5. Evolución de parámetros eléctricos según régimen

La Figura 5 evidencia que los valores de THDv y h_3 aumentan en ambas luminarias al pasar del régimen continuo a los cíclicos, aunque LED-B mantiene magnitudes sistemáticamente superiores. Este comportamiento indica una mayor sensibilidad de la luminaria compacta a las variaciones de la forma de onda de tensión y a los transitorios de conmutación. En el caso de Plt, LED-B presenta valores elevados en los regímenes continuo y de 60 minutos, seguidos de una disminución notable en los regímenes de mayor

frecuencia de conmutación. LED-A mantiene un comportamiento más uniforme en los tres parámetros evaluados. En conjunto, estos resultados muestran que LED-B es más susceptible a las variaciones dinámicas del suministro, mientras que LED-A conserva una estabilidad más homogénea en todos los regímenes operativos.

3.6. Discusión de resultados

Los resultados permiten establecer diferencias claras y técnicamente relevantes entre las dos luminarias LED evaluadas en operación continua y en regímenes cíclicos. Este comportamiento mantiene consistencia con estudios previos donde se reporta que la respuesta eléctrica de las luminarias LED depende en mayor medida de la arquitectura del driver y del diseño del filtrado que de la tecnología LED utilizada [21]. La severidad del flicker y la magnitud de los armónicos se relacionan directamente con la arquitectura interna de cada luminaria, especialmente con la topología del convertidor, el nivel de filtrado y el comportamiento térmico de los componentes, en concordancia con los mecanismos descritos en estudios previos y con los criterios de evaluación establecidos por las normas IEC aplicables [5]–[7].

La luminaria tubular multipanel mostró un desempeño estable en todos los regímenes operativos. Su índice de flicker permaneció dentro de los límites normativos incluso en ciclos prolongados, y tanto la distorsión armónica como

el contenido del tercer armónico se mantuvieron en rangos consistentes. Este comportamiento sugiere que el convertidor incorpora un sistema de compensación eficaz frente a variaciones instantáneas y acumulativas de tensión. La estabilidad observada indica que el calentamiento progresivo del driver no altera significativamente la respuesta del filtrado ni la impedancia efectiva del circuito, lo que permite mantener valores de Plt inferiores al límite establecido.

Por el contrario, la luminaria compacta de alta potencia presentó una mayor sensibilidad en los regímenes con tiempos prolongados de encendido. La operación continua produjo un incremento significativo del flicker y de los valores armónicos, comportamiento asociado a la acumulación térmica en la electrónica interna. La literatura reciente también muestra que luminarias con diseño compacto pueden carecer de estrategias avanzadas de mitigación térmica, lo que aumenta la variabilidad del comportamiento eléctrico bajo condiciones prolongadas de funcionamiento [22]. En estas circunstancias, las fluctuaciones instantáneas tienden a amplificarse y se reflejan en valores elevados de Plt , lo que coincide con los resultados observados en este estudio.

Los regímenes cíclicos permiten profundizar esta interpretación. Cuando aumenta la frecuencia de conmutación, ambos modelos presentan una reducción en los valores de Plt , lo que indica que

los intervalos breves de apagado limitan el calentamiento acumulativo. Investigaciones recientes indican que estrategias de control electrónico, como modulación PWM adaptativa o compensación activa de carga, pueden mejorar la inmunidad frente a fluctuaciones de tensión en luminarias compactas, reduciendo la sensibilidad al régimen operativo [23].

El análisis global confirma que la arquitectura electrónica de las luminarias LED es determinante en su comportamiento frente a la calidad de la energía. La luminaria tubular multipanel presenta una mayor inmunidad ante las fluctuaciones de tensión y mantiene estabilidad en todos los regímenes evaluados, lo que sugiere sistemas de filtrado más robustos o una gestión térmica más eficiente. En contraste, la luminaria compacta de alta potencia, aunque puede operar dentro de los límites normativos en regímenes cíclicos, muestra incrementos significativos de flicker y distorsión armónica en operación continua y en ciclos prolongados, lo que limita su uso en aplicaciones que requieren estabilidad eléctrica sostenida.

Los resultados muestran que la selección de luminarias LED para aplicaciones residenciales o comerciales no debe basarse únicamente en características fotométricas o en la potencia nominal, sino también en la respuesta del convertidor electrónico frente a patrones de operación representativos. La variabilidad

observada entre los modelos evaluados evidencia que la calidad de la energía debe ser considerada como un criterio técnico de selección, especialmente en instalaciones con alta densidad de carga LED, donde la acumulación de armónicos y el flicker pueden comprometer la estabilidad del suministro o generar condiciones de no conformidad normativa.

Finalmente, los resultados evidencian la necesidad de desarrollar criterios de evaluación complementarios centrados en la estabilidad eléctrica de luminarias LED bajo regímenes de operación realistas, así como la conveniencia de incorporar ensayos experimentales de larga duración que permitan identificar diferencias en el comportamiento del driver que no se manifiestan en pruebas de corto plazo. Estos elementos pueden contribuir al diseño y selección de equipos más robustos y a la optimización de sistemas de iluminación en redes de baja tensión.

4. CONCLUSIONES

- El estudio permitió caracterizar el comportamiento eléctrico de dos modelos de luminarias LED sometidas a regímenes de operación continua y cíclica, evidenciando que la arquitectura interna del driver es determinante en su desempeño frente a la calidad de la energía. La luminaria tubular multipanel mostró un

comportamiento estable en todos los regímenes, manteniendo el flicker dentro de los límites normativos y variaciones armónicas moderadas, lo que indica una adecuada capacidad de compensación frente a fluctuaciones de tensión y estabilidad térmica durante la operación prolongada.

- En contraste, la luminaria compacta de alta potencia mostró una mayor sensibilidad en los regímenes con tiempos prolongados de encendido. La operación continua y los ciclos de 60 minutos incrementaron el flicker por encima del límite admisible e intensificaron la distorsión armónica, lo que evidencia limitaciones en la gestión térmica y en la capacidad de regulación del convertidor. No obstante, en los regímenes de 30 y 10 minutos esta luminaria mantuvo valores de flicker dentro del rango permitido, lo que confirma que una mayor frecuencia de conmutación reduce los efectos térmicos acumulativos.
- Los resultados demuestran que luminarias LED con diseños electrónicos distintos pueden presentar comportamientos divergentes aun cuando comparten potencia nominal, tecnología de iluminación y condiciones de alimentación. Por ello, la selección de luminarias para

instalaciones residenciales o comerciales debe considerar no solo sus características fotométricas o energéticas, sino también su respuesta frente a la calidad de la energía, especialmente en aplicaciones que requieren estabilidad operativa sostenida o con una alta densidad de dispositivos LED conectados.

- Finalmente, los resultados resaltan la importancia de incorporar criterios de evaluación orientados a la estabilidad eléctrica de luminarias LED bajo condiciones de operación reales, así como la necesidad de realizar ensayos de larga duración que permitan identificar comportamientos no evidentes en pruebas de corto plazo. Estos elementos pueden contribuir al diseño y selección de luminarias más robustas y a la optimización de sistemas de iluminación en redes de baja tensión.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] G. Zissis, P. Bertoldi, and T. Serrenho, “Update on solid-state lighting: Market, trends, and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111483, 2021.

[2] R. C. Bansal, *Electrical Power Systems: Quality and Reliability*. CRC Press, 2006.

[3] J. Barros and R. I. Diego, “Power quality improvement in distribution networks using a particle swarm optimization-based control,” *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 9–10, pp. 725–733, 2006.

[4] CENELEC, *EN 50160: Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*. Brussels, Belgium: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2019.

[5] IEC, *IEC 61000-4-7 Electromagnetic Compatibility (EMC)—Testing and Measurement Techniques—Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2008.

[6] IEC, *IEC 61000-4-15 Electromagnetic Compatibility—Flickermeter—Functional and Design Specifications*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2010.

[7] IEC, *IEC 61000-4-30 Electromagnetic Compatibility (EMC)—Power Quality Measurement Methods*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2021.

- [8] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2017.
- [9] S. Bhattacharya, *Control of Power Electronic Converters and Systems*. Academic Press, 2019.
- [10] G. Chen, W. Xu, and P. Zhou, “Harmonic characteristics of LED lamps and analysis of influencing factors,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 1, pp. 226–234, 2020.
- [11] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, and A. Mohamed, “Analysis of harmonic distortion impacts from compact fluorescent lamps and LED lamps,” *Energy Policy*, vol. 52, pp. 701–708, 2013.
- [12] J. Xu and S. Tan, “Thermal effects on power converters in LED lighting systems: A comprehensive review,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 7, pp. 7915–7929, 2021.
- [13] R. Masnicki, J. Subocz, and A. W. Wisniewski, “Flicker emission of modern LED lighting systems under varying grid conditions,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 452–464, 2024.
- [14] G. Panda, R. Singh, and A. Sharma, “Assessment of light flicker in solid-state lamps under fluctuating supply voltage,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 2, pp. 1302–1312, 2023.
- [15] Y. Liu, H. S.-H. Chung, and A. K. H. Ding, “An investigation on the harmonic interaction between LED lamps and AC mains,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 9, pp. 6585–6598, 2016.
- [16] L. Zubieta, “Harmonic emissions and interactions of modern lighting technologies,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 125–134, 2018.
- [17] P. F. Ribeiro, J. de Oliveira, and M. S. Barros, “Effects of low-order harmonics on smart grids with high LED penetration,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 12, pp. 2181–2188, 2019.
- [18] Fluke Corporation, *Fluke 1775 Power Quality Analyzer—User Manual*. Everett, WA, USA: Fluke Corp., 2021.
- [19] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, 2nd ed. CRC Press, 2014.
- [20] M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley-IEEE Press, 2006.
- [21] Á. Gil-de-Castro, A. Gómez-Aleixandre, and L. Santiago, “Characterization of LED lamps for EMI compliance,” *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 76–84, 2018.

[22] S. Bhattacharya, *Control of Power Electronic Converters and Systems*. Academic Press, 2022.

[23] C. K. Das and M. Mithulananthan, “Efficiency and power-quality trade-offs in LED lighting systems,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 188262–188274, 2023.