

Impacto de la iluminación LED en la calidad de la energía de los circuitos de alumbrado público

Impact of LED lighting on the energy quality of public lighting circuits

Impacto da iluminação LED na qualidade energética de circuitos de iluminação pública

Mariana Quintero Quiñonez

mariana.quintero.quinonez@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9308-4423>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

Karen Yanela Simisterra Quiñonez

karen.simisterra.quinonez@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8590-6316>

Facultad de Ingenierías, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.

Marcos Rodrigo Ibarra Caicedo

marcos.ibarra.caicedo@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4658-0648>

Facultad de Ingenierías de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas-Ecuador

Violeta Elizabeth Reyes Bone

violetaelizabethreyesbone@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0003-2675-9288>

Facultad de Ingenierías de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas-Ecuador

RESUMEN

El camino hacia la eficiencia energética que muchos países han emprendido conlleva una serie de cambios en los equipos y sistemas empleados. Siendo la iluminación un consumo importante en todos los sectores, se han desarrollado diversas tecnologías que propician un menor consumo, es aquí donde aparece la tecnología LED cada vez más empleada por sus beneficios de mayor eficiencia y menores pérdidas. El uso de estas tecnologías en los sistemas de iluminación de alumbrado público es cada vez mayor en el país migrando de tecnologías de iluminación como las lámparas de vapor de sodio o incandescentes a las luminarias LED. Para el funcionamiento de esta tecnología se emplean componentes electrónicos que tienen un comportamiento no lineal generando distorsión o ruido en la forma de onda de señales de voltaje y corriente del circuito. Por lo que se presenta un análisis de los convertidores empleados para el funcionamiento de luminarias LED con enfoque en la distorsión armónica que producen y analizando el cumplimiento del estándar relacionado.

Palabras Clave: Alumbrado público, calidad de la energía, convertidores de potencia, distorsión armónica total THD, iluminación LED.

ABSTRACT

The path to energy efficiency that many countries have embarked on involves a series of changes in the equipment and systems used. As lighting is an important consumption in all sectors, various technologies have been developed that promote lower consumption, this is where LED technology appears, which is increasingly used due to its benefits of greater efficiency and lower losses. The use of these technologies in published lighting systems is increasing in the country, migrating from lighting technologies such as sodium vapor or incandescent lamps to LED luminaires. For the operation of this technology, electronic components that have a non-linear behavior are used, generating distortion or noise in the waveform of the voltage and current signals of the circuit. Therefore, an analysis of the converters used for the operation of LED luminaires is presented, focusing on the harmonic distortion they produce and analyzing compliance with the related standard.

Keywords: Street lighting, power quality, drivers, total harmonic distortion THD, LED lighting.

RESUMO

O caminho para a eficiência energética que muitos países trilharam envolve uma série de mudanças nos equipamentos e sistemas utilizados. Sendo a iluminação um consumo importante em todos os setores, foram desenvolvidas várias tecnologias que promovem um menor consumo, é aqui que surge a tecnologia LED, que é cada vez mais utilizada devido aos seus benefícios de maior eficiência e menores perdas. A utilização dessas tecnologias em sistemas de iluminação públicos é crescente no país, migrando de tecnologias de iluminação como vapor de sódio ou lâmpadas incandescentes para luminárias de LED. Para o funcionamento desta tecnologia são utilizados componentes eletrônicos que possuem comportamento não linear, gerando distorção ou ruído na forma de onda dos sinais de tensão e corrente do circuito. Para tanto, é apresentada uma análise dos conversores utilizados para o funcionamento das luminárias LED, com foco na distorção harmônica que produzem e analisando o cumprimento da norma relacionada.

Palavras-chave: Iluminação pública, qualidade de energia, conversores de energia, distorção harmônica total THD, iluminação LED.

Introducción

La energía eléctrica es una de las formas de energía más utilizada en el sector industrial, esta sirve de base para el funcionamiento de equipos y sistemas de producción, es por ello que su uso/consumo esta intrínsecamente relacionado al desarrollo productivo de un país.

Sin embargo, el consumo de energía eléctrica de un país no es un factor determinante del desarrollo puesto que la eficiencia energética incide en la transformación efectiva de la energía en trabajo. Es por tanto necesario el estudio de la eficiencia energética y por ende el impacto de la calidad de la energía en las formas de consumo y destino de la energía suministrada a los equipos eléctricos según su naturaleza. El suministro de energía eléctrica por parte de las empresas distribuidoras esta normado en cuanto al servicio comercial y las tarifas aplicadas, pero los atributos del producto que según el grado en el que se presenten constituyen un producto de mayor o menor calidad, son temas en los cuales varios organismos del sector eléctrico han estado trabajando para generar estándares sobre los cuales se basen los análisis de calidad de la energía, esto como respuesta a los problemas más frecuentes que se presentan en las industrias debido a la variación de la tensión y la frecuencia.

1.1. Iluminación LED

Las pérdidas generadas en el alumbrado público se pueden clasificar como técnicas y no técnicas, en particular las pérdidas técnicas obedecen al tipo de luminarias que se empleen, siendo las de tecnologías LED las que presentan un menor porcentaje de pérdidas comparado con las luminarias de descargar o las incandescentes.

Las principales pérdidas relacionada con la tecnología LED se obedecen al uso de los balastos o electrónica de control, dispositivos propios y necesarios para el funcionamiento de esta tecnología de iluminación. Las pérdidas en los balastos son constantes y se consideran pérdidas técnicas, ocasionadas por el efecto Joule de la circulación de corriente por la bobina del balasto. [1]

En uno de los puntos del numeral 5.2 Distribuidoras del art. 5 **Responsabilidades de las instituciones, entidades, consumidores y usuarios del servicio de alumbrado público**, de la regulación Regulación Nro. ARCERNNR 006/20 emitida por el ARCERNNR establece que se debe, instalar equipos que cumplan con las políticas, criterios de eficiencia energética y las normas de homologación emitidas por el Ministerio Rector. Es debido a esta regulación que las empresas eléctricas distribuidoras deberán regirse a los valores de consumo de auxiliares (valor máximo de pérdidas) que constan en las hojas de datos de cada tipo de luminaria, los valores máximos que se aceptarán son los establecidos en la Tabla 1. [2]

Tabla 1: Potencia máxima en auxiliares de luminarias [2]

Potencia (W)	Potencia máxima en auxiliares de luminarias de vapor de sodio de alta presión (%)	Potencia máxima en auxiliares de luminarias LED (%)
$P \leq 70$	16	10
$70 < P \leq 100$	15	
$100 < P \leq 150$	13	
$P > 150$	12	

De los datos reportados por las empresas distribuidoras de energía eléctrica en el país se observa que el promedio de las pérdidas generadas por los auxiliares de las luminarias LED se encuentran alrededor del 10%, siendo la CNEL Guayas-Los Ríos, CNEL – Santa Elena y CNEL – Sucumbíos las que reportan un porcentaje de energía perdida en auxiliares superior al 10 %. En tabla No. 2 se observa un resumen de los datos reportados por las empresas distribuidoras de energía eléctrica con corte a diciembre del 2021 [3].

Tabla 2: Alumbrado público LED en las empresas distribuidoras de energía en el Ecuador

Empresa	Cantidad	Suma de Potencia Total (kW)	Suma de Pérdidas Totales en Balastros (kW)	% de pérdidas totales
CNEL-Bolívar	2.679	324,70	32,47	10,00
CNEL-EI Oro	4.940	697,13	67,63	9,70
CNEL-Esmeraldas	1.592	160,91	16,47	10,24
CNEL-Guayaquil	3.012	508,04	-	-
CNEL-Guayas Los Ríos	2.460	334,31	42,27	12,64
CNEL-Los Ríos	818	126,96	12,70	10,00
CNEL-Manabí	6.779	1007,66	100,77	10,00
CNEL-Milagro	1.627	215,57	21,56	10,00
CNEL-Sta. Elena	1.283	190,50	28,66	15,04
CNEL-Sto. Domingo	3.943	410,59	4,97	1,21
CNEL-Sucumbíos	784	86,96	10,43	11,99
E.E. Ambato	14.255	2689,77	268,98	10,00
E.E. Azogues	1.273	131,525	4,165	3,17
E.E. Centro Sur	7.974	975,071	97,734	10,02
E.E. Cotopaxi	1.601	183,976	12,651	6,88
E.E. Galápagos	3.851	372,806	37,384	10,03
E.E. Norte	8.810	1193,386	119,463	10,01
E.E. Quito	5.594	531,238	53,987	10,16
E.E. Riobamba	6.478	1090,307	109,442	10,04
E.E. Sur	5.898	852,057	85,206	10,00
TOTAL	85.651	12.083	1.127	9,33

En total a diciembre de 2021 en el país se cuenta con 85 651 luminarias con tecnología LED, de entre 3,6 y 2500 W instaladas en las diferentes provincias, siendo la Empresa Eléctrica Ambato S.A. la distribuidora con un mayor número de luminarias LED, 14 255 luminarias en su sistema de alumbrado público general. A continuación se puede observar en la figura No. 1 La distribución de las luminarias LED instaladas y gestionadas por cada una de las empresas distribuidoras del país. [4]

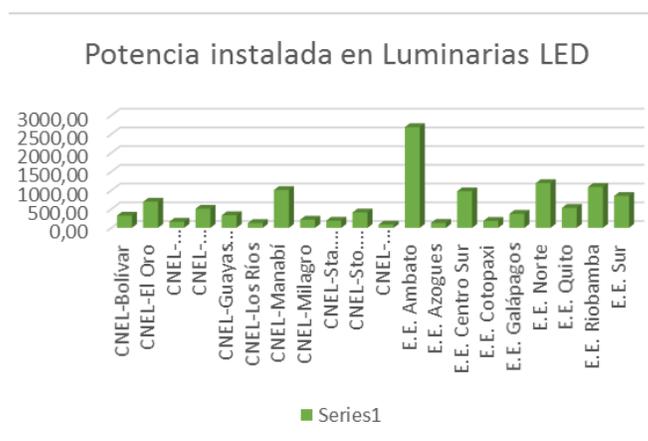


Figura 1. Potencia instalada en luminarias LED en las Empresas Distribuidoras del Ecuador

De la misma forma se puede visualizar la cantidad de luminarias por unidad con las cuenta cada una de las empresas distribuidoras en su sistema de alumbrado público, tal como se muestra en la figura No. 2 son las empresas eléctrica de mayor cantidad de luminarias LED instaladas a diciembre de 2021.

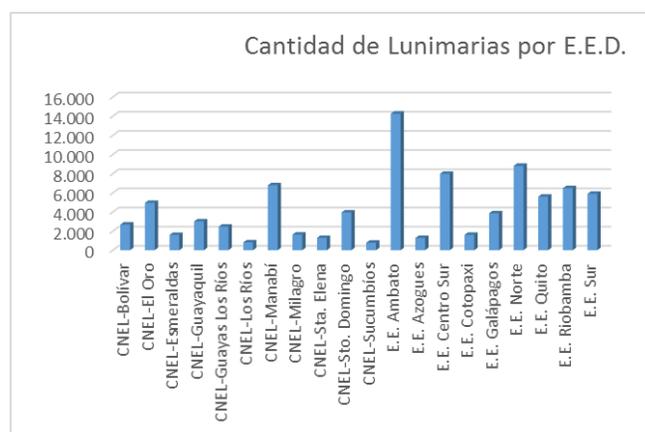


Figura 2 Cantidad de luminarias LED instaladas en el Sistema de Alumbrado Público por Empresa Eléctrica Distribuidora en el Ecuador

Dentro del sistema de alumbrado público de las empresas eléctricas y las distribuidoras que conforman la Cooperación Nacional de Electricidad CNEL EP, a diciembre del 2021 se reportaron 20'631.856,00 luminarias instaladas con una potencia total de 3366 MW registrando 445 MW en pérdidas técnicas. De

las diferentes tecnologías de iluminación disponible en el Ecuador se cuentan con: Tecnologías LED, de Sodio, Haluro metálico, de mercurio, reflectores entre otras; de las cuales 85.651,00 luminarias son de tipo LED de diferentes potencias, las cuales son gestionadas por las empresas distribuidoras, evidenciando un crecimiento del % que para el 2012 se reportan tan solo 454 luminarias LED en el Sistema de Alumbrado público General de las empresas distribuidoras, según el SISDAT Sistematización de Datos del Sector Eléctrico. [4]

Es por este creciente uso y empleo de las luminarias LED que resulta importante estudiar, la reducción de pérdidas que efectivamente se consigue con el uso de la tecnología LED con relación a las luminarias de descarga y fluorescentes y por tanto su aporte en la eficiencia energética, sino también analizar los fenómenos electromagnéticos que generan al introducir armónicos, es decir deformaciones (ruido) en las señales de tensión y corriente en la red eléctrica afectando la calidad de la energía en el sistema.

1.2. Calidad de la energía

Para iniciar con el análisis de las componentes de la calidad de la energía es importante conocer su conceptualización. Este término no tiene una definición única, pero los estándares internacionales más importantes definen a la calidad de la energía eléctrica o calidad de suministro eléctrico de la siguiente manera:

Según el estándar IEEE 1159 se entiende a la calidad de energía eléctrica como la gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica [5]”.

En la misma línea Harper define a la calidad de la energía como una ausencia de interrupciones, sobretensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario; esto concierne a la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico [6].

Una característica importante de la electricidad es que la utilización por parte de los consumidores modifica sus características. En particular las cargas que tienen un comportamiento no lineal generar distorsión en las señales de tensión y corriente Por lo cual el tipo de carga conectada a la red, las características de la demanda de cada uno de los equipos conectados hacen que los parámetros de la tensión y la corriente varíen, por lo cual podemos agrupar a las perturbaciones que se generan en el sistema en 5 grandes grupos:

1. La amplitud de la tensión
2. La frecuencia
3. La forma de la señal
4. El balance de las fases
5. La continuidad
- 6.

2. Materiales y Métodos

Los conceptos considerados se identifican a continuación para el estudio de la calidad de la energía eléctrica en los sistemas e iluminación LED.

2.1. Impacto de la iluminación LED en la calidad de energía

En el caso del consumo de energía eléctrica las luminarias LED son responsables en gran parte de la inyección de corrientes armónicas en redes eléctricas ya que son producidas por cargas no lineales, estas afectaciones pueden reducir la vida útil de estos aparatos considerablemente, debido a que estas corrientes armónicas no solo producen estrés en los equipos debido al sobrecalentamiento, sino también, y sobre todo, generan pérdidas adicionales de energía. [7]

Las luminarias que funcionan con la tecnología tipo LED también adquieren sus características de carga no lineal, por lo que generan corriente que no son señales sinusoidales puras tal como lo explica la norma IEEE 519-1192, la cual define “a una carga no lineal como una carga que dibuja una onda de corriente no sinusoidal cuando es proporcionada por una fuente de voltaje sinusoidal” [8]

Actualmente se emplean equipos o cargas eléctricas que se consideran de tipo no lineal, estas cargas son generadores de armónicos en las señales de tensión y corriente, los dispositivos electrónicos tales como computadoras, balastos electrónicos, variadores de velocidad, fuentes de alimentación son equipos que funcionan basados en componentes de electrónica de potencia tales como diodos tiristores, transistores, triac y diac. Por lo cual se les atribuyen a este tipo de equipos la generación de perturbaciones eléctricas e introducción de armónicos en las redes a las que se conectan.

Al ser estas cargas de tipo no lineal, es decir que presentan señales con una forma de onda que no es sinusoidal sino que contienen gran contenido de distorsión de armónicos. Por lo que estas cargas afectan a los parámetros que se estudian para caracterizar la calidad eléctrica. La presencia de armónicos puede deteriorar la calidad de la señal eléctrica. Una onda de tensión debe tener idealmente una forma de onda puramente sinusoidal por lo que toda deformación o ruido de estas perturbaciones, este ruido en la señal sea de tensión o corriente modifican el valor RMS por lo que se afecta la calidad de la energía. [9]

2.2. Límites de armónicos

Son varias las normas y estándares que estudian, analizan y determinan límites para las corrientes armónicas en las redes eléctricas a nivel internacional. Considerando las dos más importantes debido a que son las más comúnmente aceptadas y adoptadas por los países para emitir sus normativas se presentará la norma IEEE-519 y la IEC -61000-3-2, que trata los conceptos de armónico y TDH y define límites para la emisión de armónicos por clases de equipos incluyendo los de iluminación cada una respectivamente. [10]

2.2.1 IEEE-519

En esta normativa se establecen objetivos para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales. Se describen las formas de onda de voltaje y corriente que pueden existir en todo el sistema, y se establecen los objetivos de distorsión de la forma de onda para el diseñador del sistema.

Dentro de las definiciones que se prescriben en este estándar como principales se tiene la siguiente, que son las cuales se toman en consideración para este estudio [11].

- **Armónico** (componente): un componente de orden mayor que una de las series de Fourier de una cantidad periódica. Por ejemplo, en un sistema de 60 Hz, el orden armónico 3, también conocido como el "tercer armónico", es 180 Hz.
- **Distorsión armónica total** (THD): La relación del cuadrado medio raíz del contenido armónico, considerando componentes armónicos hasta el orden 50 y excluyendo específicamente la interarmónica, expresada como un porcentaje del fundamental. Se pueden incluir componentes armónicos de orden superior a 50 cuando sea necesario.

2.2.2IEC-61000-3-2

En esta norma agrupa a los equipos en clases diferentes, ubicando a los equipos de iluminación en la Clase C. A su vez para la definición de los límites armónicos de estos equipos se subdividen según su potencia activa, siendo 25 W la frontera divisoria.

Para los equipos de iluminación con una potencia activa superior a 25 W, las corrientes armónicas están limitadas a los valores dados en la tabla 3.

Tabla 3: Límites de corriente armónica para equipos clase C (> 25W)

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible expresada en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental %
2	2
3	$30 \cdot \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ Solo armónicos impares	3
* λ es el factor de potencia del circuito	

Los límites dados en la tabla aplican para equipos de iluminación incandescentes que incorporan reguladores de luz. Mientras que la los equipos de iluminación de descarga que incorporen reguladores se aplican las siguientes condiciones en carga máxima los valores de corriente deben ajustarse a los límites definidos en la tabla No. Mientras para cualquier posición del regulador la corriente armónica debe ser inferior al valor límite en condiciones de carga máxima [12].

Equipos de potencia inferior a 25 W

Para los equipos de iluminación con una potencia activa inferior a 25W l la norma IEC-61000-3-2 establece dos condiciones; las corrientes armónicas no pueden tener un valor superior a los definidos

en la tabla No. 4, columna 2 o la amplitud de la corriente armónica expresada en porcentaje de orden 3 y orden 5, no podrá ser superior al 86% y 61% de la corriente respectivamente. [10]

Tabla 4: Límites de corriente armónica para equipos clase C ($\leq 25W$) [11]

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible por vatio mA/W	Corriente armónica máxima admisible A
2	3,4	2,30
3	1,9	1,14
5	1,0	0,77
7	0,5	0,40
9	0,35	0,33
$11 \leq n \leq 39$ Solo armónicos impares	$3,85/n$	-

2.3. Convertidores de potencia (drivers) empleados en luminarias LED

Los denominados drivers son dispositivos convertidores de potencia que su función es mantener la potencia requerida por el LED en las condiciones de tensión y corriente necesarias para su funcionamiento. Estos drivers deben ser capaz de responder a las variaciones de los parámetros del sistema para suministrar una energía constante.

Corriente constante

Los drivers o convertidores de potencia denominados de corriente constante, son aquellos que regulan la energía variando la tensión o voltaje suministrado mediante un circuito electrónico, que permite mantener la corriente eléctrica constante. Esto asegura que independientemente de la variación en el voltaje, la corriente suministrada a los LED no cambia.

En el manual de Sylvania se establecen las siguientes como las características principales de los convertidores de potencia de corriente tensión constante. [13]:

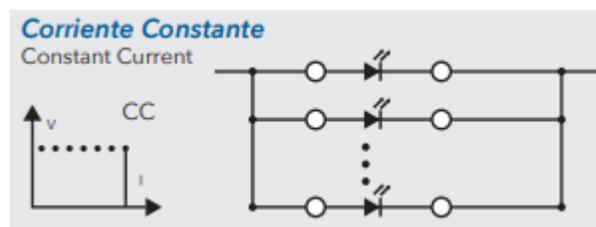


Figura 3 Convertidor de corriente constante [13]

Características:

- Mantiene la corriente de salida constante independientemente del número de LED conectados a la salida.
- La tensión de salida está determinada por el número de LED conectados en serie.
- Solución con muy buen rendimiento al no ser necesario el uso de resistencias en la salida del driver. Óptimo para iluminación.

Tensión Constante

Los convertidores de tensión o de voltaje constante tienen una tensión fija, es decir son capaces de suministrar un nivel de voltaje que no varía en el tiempo, a pesar de las variaciones que pueda experimentar la fuente; tensiones salidas comunes pueden ser 12 VDC o 24 VDC en el circuito.

Para estos convertidores el manual de Sylvania establece las características principales:

- Mantiene una tensión constante a la salida del driver haya o no haya carga conectada.
- Solución de muy bajo rendimiento, ya que hay que conectar a la salida una resistencia para limitar la corriente que va a circular a través del LED, produciendo pérdidas en dicha resistencia.

Los convertidores de voltaje constante es un tipo de convertidor muy usado en los diseño con tecnología LED, cuando se tiene la conexión de múltiples LED en un solo circuito.

El funcionamiento del convertidor AC/DC se puede representar según el esquema que se muestra a continuación [14]:

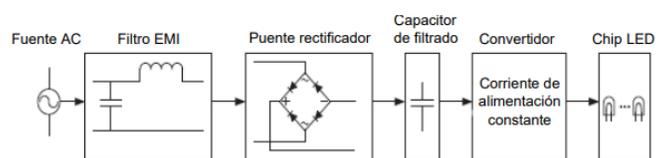


Figura 4 Esquema de bloques de un convertidor AC/DC [14]

Este esquema contiene varios bloques, primero encontramos la fuente suministradora de energía para el circuito, a continuación el filtro de interferencia electromagnética que filtra la señal reduciendo los componentes armónicos. El puente rectificador es el encargado de convertir la tensión alterna en continua eliminando la parte negativa de la onda. El capacitor cumple la función de reducir el rizo resultante de la rectificación de la onda, finalmente se encuentra el convertidor que controla la corriente entregada al LED. Es este bloque en definitiva el causante de la generación de armónicos e introducción de estas componentes no fundamentales a la red eléctrica debido a su funcionamiento conmutado. [14]

Las configuraciones de convertidores de alimentación constante (tensión o corriente) son las siguientes, misma que puede clasificarse según diferentes parámetros. Por la naturaleza propia de los elementos que utiliza que incluyen o no un transformador se presenta a continuación su clasificación considerando su nivel de aislamiento entre la fuente y la salida del convertidor.

Aislados

- Buck
- Boost
- Buck-Boost

No aislados

- Flyback
- Forward

Convertidor Flyback

Un convertidor Flyback combina un transformador que le brinda aislamiento galvánico gracias a su inductor acoplado y elementos activos para la conmutación [9].

Este es el convertidor más ampliamente utilizado para el funcionamiento de la tecnología LED, por lo cual se presenta un análisis de su funcionamiento basado en el convertidor Buck-Boost.

Ventajas

- Factor de potencia cercano a la unidad
- Corrección natural del factor de potencia en modo de conducción discontinua
- Simplicidad en su control

Desventajas

- Baja eficiencia por filtro contra filtros de voltaje

En la figura No. 5 se observa la configuración de un convertidor flyback, que cuenta principalmente con un transformador con relación de tensión $N1/N2$, un transistor para la conmutación, un diodo rectificador en el secundario, un condensador de salida y finalmente el diodo LED simulado con una carga conectada al circuito [9].

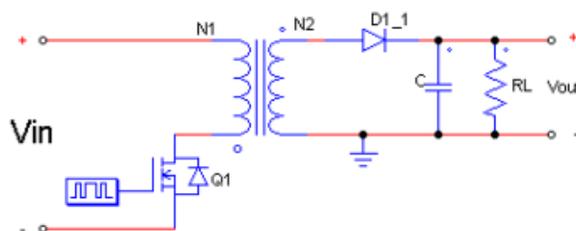


Figura No. 5 Diagrama de la topología Flyback [15]

Cuando el conmutador está en estado ON, el diodo rectificador del secundario se polariza inversamente, la corriente incrementa en el devanado primario, según la siguiente ecuación [15]

$$I_{PRI} = I_1 + \frac{(V_{IN} - V_{DS(ON)}) \times t_{ON}}{L_p}$$

I_1 : es el valor inicial de la corriente primaria en amperios

V_{IN} : es el voltaje de entrada de CC después del diodo puente

$V_{DS(ON)}$: Voltaje de conmutador

t_{ON} : es el tiempo en estado ON

L_p : es la inductancia primaria del transformador en Henrios (H)

Cuando el conmutador se apaga, la polaridad del secundario se invierte propiciando la conducción del diodo del secundario, esto permite la descarga del transformador que carga al condensador de salida e inyectando corriente a la carga, el valor de la corriente disminuye conforme la siguiente ecuación [16]:

$$I_{SEC} = \frac{I_p \times N_p}{N_s} - \frac{(V_o - V_{D2}) \times t_{OFF} \times N_p^2}{N_s^2 \times L_p} \quad I_{SEC} \geq 0$$

I_p : es el valor de pico de la corriente primaria

N_p : es el número de espiras del primario

N_s : es el número de espiras del secundario

V_o : es el voltaje de salida de la fuente

V_{D2} : es el voltaje de polarización directa de D2

t_{OFF} : es el tiempo de apagado del conmutador

El tiempo de carga del primario y descarga del secundario del transformador en los momentos de encendido ON y apagado OFF es la base del funcionamiento del Flyback. [9]

De esta operación se puede establecer dos modos de funcionamiento, conforme la corriente del secundario y el tiempo de conmutación ON/OFF, dando lugar a los modos de conducción continuo y modo de conducción discontinuo.

Modo de operación continuo

Cuando el convertidor está en modo de operación continuo la corriente secundaria no se reduce completamente, por lo que la corriente primaria comienza un paso de corriente igual al valor final de la corriente secundaria misma que se refleja conforme la relación de transformación.

La tensión que se refleja se mantiene hasta el ciclo de apagado (OFF) hasta que el conmutador vuelve a encenderse [15]

Modo de conducción discontinuo

En MCD la energía almacena en el núcleo mediante la inductancia magnetizante se entrega al devanado secundario durante la fase OFF y la corriente primaria decae a cero antes de que el transistor vuelva a encenderse [15]

3. Resultados y Discusión

3.1 Diseño de un convertidor y pruebas realizadas a diferentes LED driver's

En este apartado se presentan los resultados de trabajos anteriores en los cuales se han realizado pruebas a diferentes convertidores de potencia tanto comerciales, como a diseños de convertidores mejorados que incluyen corrección del factor de potencia. [15]

El convertidor cuenta los valores de diseño descritos en la tabla No. 5 en la que se establece entre los parámetros más importantes una eficiencia del 80%.

Tabla 5: Parámetros de diseño de un controlador Flyback

Parámetros de diseño	
V_{acmax}	$127V_{rms} * \sqrt{2}$
V_{acmin}	$90V_{rms} * \sqrt{2}$
$D_{m\acute{a}x}$	0.5 (integrado FT833B12)
f_{sw}	52000 Hz
V_0	20 V
P_0	6 W
V_{do}	1 V caída de voltaje en diodo de salida
η	80% eficiencia

Para la validación del convertidor de tipología flyback diseñado, se establece el esquema para las pruebas de los convertidores estudiar, representado en la figura No. 6:

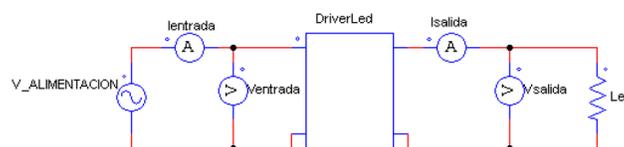


Figura 6 Protocolo de pruebas de convertidores [14]

Se eligen dos drivers comerciales para las someterles a las mismas pruebas de validación del convertidor diseñado, Eilum y Ledex. Se realizan pruebas de tensión y corriente en la entrada y salida del convertidor para calcular su potencia, y con esto la eficiencia del dispositivo, obteniendo los datos detallados en la tabla No. 6.

Tabla 6: Análisis de eficiencia de convertidores de potencia [14]

Driver	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)	η con respecto a Eilum
Eilum	6,27	5,121	81,67	0
Ledex	7,368	6,03	81,84	0,2 %
Prototipo	6,893	5,755	83,49	2,2 %

Con el objetivo de validar las corrientes armónicas generada por cada uno de los convertidos, se aplica mide también la tasa de distorsión armónica total THD en corriente, obteniendo los resultados mostrados a continuación en la tabla No. 7.

Tabla 7: Consumo de corriente armónica por equipos probado

	Eilum	Ledex	Prototipo
Frecuencia (Hz)	I (mA)	I (mA)	I (mA)
60 (Armónico 1)	54,8	61,2	69,6
180 (Armónico 3)	44,4	48,2	52,2
300 (Armónico 5)	29,8	29,2	28,4
420 (Armónico 7)	16	14,8	13,6
540 (Armónico 9)	10	11,8	13,4
660 (Armónico 11)	9,4	10,4	11,4
780 (Armónico 13)	7,4	8	9,4
900 (Armónico 15)	5,4	8,4	9,6
THD (%)	106,21	100,41	93,18

De los datos obtenidos de las corrientes armónicas generadas en los convertidores podemos observar que el tercer amónico es en promedio el de porcentaje más cercano a la frecuencia fundamental siendo hasta un 81% de la corriente fundamental, lo que representa un alto porcentaje de pérdidas, y mayores efectos adversos en los equipos, en la tabla No. Se han definido los porcentajes de armónicos por cada

frecuencia impar; ya que es muy útil mantener este dato en porcentaje para poder realizar un análisis de cumplimiento de normativa que regula el contenido máximo de armónicos en equipos de iluminación.

Tabla 8: Porcentaje de armónicos de corriente en los convertidores de potencia

Frecuencia (Hz)	Eilum		Ledex		Prototipo	
	I (mA)	%	I (mA)	%	I (mA)	%
60 (Armónico 1)	54,8	100,00	61,2	100,00	69,6	100,00
180 (Armónico 3)	44,4	81,02	48,2	78,76	52,2	75,00
300 (Armónico 5)	29,8	54,38	29,2	47,71	28,4	40,80
420 (Armónico 7)	16	29,20	14,8	24,18	13,6	19,54
540 (Armónico 9)	10	18,25	11,8	19,28	13,4	19,25
660(Armónico 11)	9,4	17,15	10,4	16,99	11,4	16,38
780(Armónico 13)	7,4	13,50	8	13,07	9,4	13,51
900(Armónico 15)	5,4	9,85	8,4	13,73	9,6	13,79
THD (%)	106,2		100,4		93,18	

3.2 Análisis de resultados comparados con norma IEC 61000:3-2

Considerando la norma IEC 61000:3-2 en la que se establece la corriente armónica máxima permisible por vatio para equipos con potencia inferior a 25W, conforme se detalló en la tabla No.

En la tabla No. 9 se analiza el cumplimiento de los valores máximos comparados con los obtenidos para los convertidores probados, Conforme la norma IEC relacionada a la distorsión armónica, se determina el estudio de la comparativa sobre el tercer armónico en la iluminación LED, por los efectos que estos producen en la red eléctrica. [10]

De la tabla No. 9 Se obtienen las desviaciones de la corriente armónica medida en los diferentes convertidores, en relación con los valores máximos permisibles en la IEC 61000:3-2 establecidos para equipos de iluminación.

Tabla 9: Comparación de las corriente armónicas en los convertidores y los límites máximo establecidos en la norma IEC 61000:3-2

Frecuencia (Hz)	Normativa	Datos Driver		Cumplimiento	
	(mA/W)	P (W)	I (mA)	I (mA)	%
Eilum	3,4	6,27	21,32	44,4	208,25
Ledex	3,4	7,36	25,02	48,2	192,64
Prototipo	3,4	6,89	23,42	52,2	222,88

En este caso se observa que si bien los valores de corriente necesaria para cubrir el contenido de armónicos están se encuentran en el orden de los miliamperios, y presentan los convertidores eficiencias superiores al 80% generan un alto contenido de armónicos que se inyectan a la red que les suministra energía.

Estos en definitiva son las perturbaciones de mayor importancia que generan las luminarias LED en redes eléctrica, por lo que su impacto está determinado por lo convertidores con capacidad para disminuir o atenuar los armónicos, implementando filtros en su configuración.

4. Conclusiones

Los convertidores utilizados para el funcionamiento de las luminarias con tecnología LED, son dispositivos que integran componentes no lineales, por que hace que el consumo de corriente en los mismo tenga una forme de onda que no es puramente senoidal inyectando ruido en la señal, a esta perturbación se denomina armónicos que son parámetros que influyen directamente en la calidad de la energía del sistema eléctrico que suministra la energía.

El alumbrado público en el país ha venido modernizando sus sistemas de iluminación, implementando la tecnología LED sobre todo en sistemas de alumbrado público ornamental, así como en vías y carreteras de alto tránsito ya que su potencia lumínica es mucho mayor a las lámparas de descargas o incandescente anteriormente empleadas.

Si bien las luminarias LED tiene una mayor eficiencia comparada con otras tecnologías de iluminación más convencionales haciendo que estas cumplan con lo que establece el ARCERNNR en su regulación 006/20 referente a las pedidas en auxilias de luminarias LED no deben superar un 10%, de los datos reportados por las empresas de distribución eléctrica del país, este es un parámetro que se cumple, teniendo un promedio de pérdidas del 9,33%. Para los niveles máximos de corriente armónica permisibles en equipos de iluminación los convertidos empleados en los sistemas de luminarias LED sobre pasan los valores establecidos, es por ello que el estudio y mejoramiento de los convertidores se hace cada vez más necesario para reducir este impacto de la iluminación LED en la calidad de la energía.

Las conclusiones deben obtenerse, por tanto, a partir de algo más que de los simples datos registrados. De hecho, unos datos o resultados pueden tener un sentido u otro y, por tanto, pueden llevarnos a unas conclusiones y otras, dependiendo del marco conceptual que justifica nuestra investigación, de la metodología seguida, de los objetivos propuestos, etc.

Referencias

1. Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, “Reportes de Información Estadística del Sector Eléctrico” [online]. Ecuador, 2021. Ecuador, 2021 Disponible en <http://reportes.controlrecursosyenergia.gob.ec/>
2. ARCERNNR – Prestación del Servicio de Alumbrado Público general, REGULACIÓN Nro. ARCERNNR 006/20, Dic. 2020.
3. B. Loza Ortega, E. Pacheco Chérrez, “Diseño y Construcción de un convertidor de potencia para luminarias tipo LED”, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2017. Disponible en
4. Barbosa, L. A. Noguera y W. M. Giral, “Análisis de distorsión armónica en iluminación LED”. Revista Vínculos, vol 14, no 2, julio-diciembre 2017, 95-107. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.12520>
5. Costa, M. A., Costa, G. H., dos Santos, A. S., Schuch, L., & Pinheiro, J. R. (2009, September). A high efficiency autonomous street lighting system based on solar energy and LEDs. In *2009 Brazilian Power Electronics Conference* (pp. 265-273). IEEE.
6. Dalla Costa, M. A., Schuch, L., Michels, L., Rech, C., Pinheiro, J. R., & Costa, G. H. (2010, March). Autonomous street lighting system based on solar energy and LEDs. In *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology* (pp. 1143-1148). IEEE.
7. Enrique G. Harper, “El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica”, 2da ed., vol. 2, Ed. Limusa, México, España, Venezuela, Colombia 2001, pp. 20–29. Guía técnica de Iluminación, Sylvania. Disponible en <https://sylvania.com.ec/wp-content/uploads/2021/01/Manual-t%C3%A9cnico-de-iluminaci%C3%B3n-Sylvania.pdf> <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27300/1/Tesis%20Pdf>
8. IEC, “Compatibilidad electromagnética – Límites para las emisiones de corriente armónica”, IEC 61000-3-2: 2019, Abril 1, 2019.

9. IEEE, “*Recommended practice for monitoring electric power quality*”, Std 1159, Agosto 13, 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486”.
10. Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, Ecuador – Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano” [online]. Ecuador, 2021 Disponible en https://anda.inec.gob.ec/anda/index.php/catalog/907/get_microdata
11. J. Romero Alvarado, J. Roman Lara, “Diseño de una fuente de alimentación en modo conmutado usando la topología flyback para aplicaciones en iluminación LED”, Universidad Privada Anterior Orrego, Peru, 2016.
12. Kumar, N. (2013, March). Smart and intelligent energy efficient public illumination system with ubiquitous communication for smart city. In *International Conference on Smart Structures and Systems-ICSSS'13* (pp. 152-157). IEEE.
13. M. Brusil Guamán, “Análisis de perturbaciones armónicas producidas por luminarias de tecnología LED en una red de alumbrado público” Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020. Disponible en <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20820>
14. Mitelyov, S. V., & Tsvetkov, V. A. (2011). ILLUMINATION OF CITIES ILLUMINATION OF A PUBLIC GARDEN NEAR ST.-PETERSBURG STATE THEATRE" BUFF" USING LIGHT EMITTING DIODES. *Light & Engineering*, 19(3).
15. P. Otero, R. Ayala, y V. Calle, «Metodología de cálculo de pérdidas de potencia y energía en el sistema de alumbrado público del Ecuador», re, vol. 17, n.º 1, pp. PP. 43-51, jul. 2020.
16. P. Otero, R. Ayala, y V. Calle, «Metodología de cálculo de pérdidas de potencia y energía en el sistema de alumbrado público del Ecuador», re, vol. 17, n.º 1, pp. PP. 43-51, jul. 2020. REEMPLAZAR POR LUIS DESCHERES
17. Peña-García, A., Hurtado, A., & Aguilar-Luzón, M. C. (2015). Impact of public lighting on pedestrians’ perception of safety and well-being. *Safety science*, 78, 142-148.
18. S. Del Olmo Martín, “Estudio y análisis armónico de intensidades de alimentación de lámparas de iluminación LED de baja potencia” Proyecto de titulación, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021.
19. Y. Pinargote, C. Bustamante, “Estudio de armónicos producidos por la iluminación tipo fluorescente y LED en un aula del bloque B de la universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil” Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil - Ecuador, 2018.