

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO
COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE ENERGÍA

**Análisis de la distorsión armónica con
iluminación fluorescente y led. Caso de
estudio: edificio A, plantel San Lorenzo
Tezonco de la UACM**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN:

**INGENIERÍA EN
SISTEMAS ENERGÉTICOS**

PRESENTA:

IRAN AREMI CABRERA GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Manuel Antonio Corona Sánchez, PEUACM

CODIRECTOR

Dr. Carlos Chávez Baeza, PEUACM

Ciudad de México, Marzo, 2025

Integración del jurado:

Presidente: Dr. Edgar Vicente Torres González, UACM
Secretario: Dr. Manuel Antonio Corona Sánchez, PEUACM
Vocal: Dr. Carlos Chávez Baeza, PEUACM
1^{er}. Suplente: Dr. Fernando Gabriel Arroyo Cabañas, UACM
2^{do}. Suplente: Dr. Ma. Claudia Roldan Ahumada, UACM

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM.

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Manuel Antonio Corona Sánchez
Programa de Energía – UACM

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por darme la oportunidad de demostrarme que puedo lograr cualquier objetivo que me proponga. Y ser mi segundo hogar que me permitió crecer profesionalmente y que ha sido, sin duda, el inicio para cambiar mi vida.

A mi director de tesis, el Dr. Manuel Antonio Corona Sánchez por su disposición en el momento que siempre lo necesite, por su paciencia y dedicación. Sus enseñanzas fueron esenciales para mi trabajo.

A mi codirector de tesis, el Dr. Carlos Chávez Baeza, por apoyarme en aclarar todas mis dudas, su apoyo a sido imprescindible para el desarrollo de este trabajo. Por el apoyo constante y su tiempo para ayudarme a mejorar.

Al Dr. Fernando Gabriel Arroyo Cabañas, la Dr. Ma. Claudia Roldan Ahumada y al Dr. Edgar Vicente Torres González por su apoyo en la revisión de mi trabajo.

Al programa de energía por ser un apoyo constante y esencial en los primeros pasos de mi carrera profesional.

A todos mis compañeros de la UACM, todos han aportado a mi crecimiento personal y profesional.

Y a la UACM por otorgarme el apoyo económico, que fue un pilar para que pudiera alcanzar mis metas.

Quiero saborear y celebrar todos y cada uno de los días,
no temer la experiencia del dolor, ni encerrarme en un caparazón
para evitar sentir, ni dejar de interrogar y cuestionar la vida,
ni terminar tomando el camino más fácil.
Que jamás deje de aprender y pensar, de vivir y
aprender con lucidez, una comprensión y un amor siempre renovados.

Sylvia Plath

Diarios

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 7 |
| Capítulo I. Marco Contextual | 9 |
| 1.1 Antecedentes | 9 |
| 1.2 Planteamiento del Problema | 10 |
| 1.3 Justificación | 12 |
| 1.4 Objetivos | 14 |
| 1.4.1 Objetivo General | 14 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos..... | 14 |
| Capítulo II. Marco Teórico | 15 |
| 2.1 Calidad de la energía eléctrica | 15 |
| 2.2 Factor de Potencia..... | 18 |
| 2.3 Distorsión Armónica..... | 20 |
| 2.3.1 Secuencia de las armónicas..... | 21 |
| 2.3.2 Causas de la distorsión armónica..... | 23 |
| 2.3.3 Efectos de la distorsión armónica | 24 |
| 2.3.4 Características de la distorsión armónica | 25 |
| 2.3.5 Índices de las distorsiones armónicas | 26 |
| 2.3 Cargas no lineales..... | 27 |
| 2.4 Lámparas fluorescentes | 28 |
| 2.5 Lámparas de estado sólido de diodos de emisores de luz (LED)..... | 30 |
| 2.6 Normativa Aplicable | 32 |
| 2.7 Medición de parámetros eléctricos y calidad de la energía..... | 37 |
| Capítulo III. Metodología | 39 |
| 3.1 Medición de parámetros eléctricos y de calidad de la energía..... | 40 |
| 3.1.1 Parámetros de calidad de la energía registrados:..... | 40 |
| 3.1.2 Conexión del analizador de redes | 41 |
| 3.1.3 Cálculo de la impedancia relativa..... | 42 |
| 3.1.4 Sistema de iluminación con lámparas fluorescentes | 44 |
| 3.1.5 Sistema de iluminación con lámparas LED..... | 44 |
| Capítulo IV. Análisis de Resultados | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1 Análisis de la Distorsión Armónica en tensión de las lámparas fluorescentes y LED..... | 46 |
| 4.2 Análisis de la Distorsión Armónica Total en Corriente de las lámparas fluorescentes y LED . | 49 |
| 4.3 Análisis de los componentes armónicos | 52 |
| 4.3.1 Componentes Armónicas de tercer orden..... | 52 |
| 4.3.2 Componentes armónicas de quinto orden | 58 |
| 4.3.3 Componentes armónicas de séptimo orden..... | 63 |
| 4.3.4 Componentes armónicas de onceavo orden | 68 |
| 4.4 Factor de Potencia..... | 73 |
| Conclusiones | 76 |
| Referencias | 79 |
| Anexos | 83 |
| Anexo A. Balastros de atenuación fluorescentes Marca Lutron..... | 83 |
| Anexo B. Tubos LED Essential T8 Marca Philips | 85 |

Introducción

El crecimiento del sistema eléctrico y la incorporación de una variedad de usuarios al sistema, ha derivado en estudiar el impacto de las nuevas tecnologías en la calidad de la energía. La calidad de la energía se entiende por los límites de los parámetros eléctricos que permiten que los elementos que integran el sistema operen de forma adecuada. La medición de variables eléctricas nos permite identificar el estado del sistema y corregir posibles afectaciones.

En el edificio de A, del Plantel San Lorenzo Tezonco de la UACM, se realizó un cambio de lámparas fluorescentes a LED con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y la calidad de la iluminación en los diferentes espacios que existen en el edificio; beneficiando a los usuarios y reduciendo el consumo de energía de la Universidad. Las lámparas fluorescentes y LED, al ser dispositivos que trabajan con corrientes no proporcionales a la tensión por naturaleza, generan armónicos. El objetivo principal de esta tesis es analizar las posibles afectaciones a la calidad de la energía al instalar lámparas LED y realizar la comparación con la tecnología fluorescente, que era la tecnología instalada anteriormente.

Para el desarrollo del análisis se presenta en primera instancia el capítulo I “Marco Contextual” para examinar los estudios que nos muestran los inconvenientes de tener en un sistema eléctrico una cantidad alta de lámparas, ya sean fluorescentes o LED, conectadas y sus efectos sobre sistema eléctrico de los usuarios.

En el capítulo II “Marco Teórico”, se aborda la importancia de la calidad de la energía, del porqué comenzó a ser importante desde el desarrollo de la electrónica de potencia y de la normativa que surge para evaluar los diferentes parámetros involucrados para un estudio correcto de la calidad de la energía. Se desarrolla el concepto del factor de potencia, así como su importancia para los sistemas eléctricos. Más adelante se desarrolla el concepto de la distorsión armónica, sus características esenciales, el origen de la distorsión armónica y sus efectos a largo plazo. También se abordan los tipos de cargas que pueden afectar a los sistemas eléctricos y las causas que afectan a la calidad de la energía.

Para el capítulo III “Metodología”, se explica el proceso que se consideró para evaluar el sistema de iluminación del edificio A. Comenzando por tener claro el dispositivo que se va a usar para recabar información, los parámetros esenciales de los cuales se recabo información y el tiempo necesario para tener todos los datos. También se describe el analizador de redes usado para el análisis y la manera correcta de su instalación.

Finalmente, en el capítulo IV “Análisis de datos” se detallan los datos obtenidos del analizador de redes, de manera que se ha desglosado comenzando por la distorsión armónica total (THD_v), la distorsión armónica total de corriente (THD_i), las componentes armónicas 3^{era}, 5^{ta}, 7^{ma} y 11^{va}. En cada una se realiza la comparación de las lámparas fluorescentes y de las lámparas LED. Para concluir el capítulo se realiza un análisis del factor de potencia para cada tecnología de iluminación.

Capítulo I. Marco Contextual

1.1 Antecedentes

La iluminación es importante para el desarrollo de una sociedad, ya que es parte de tener una buena calidad de vida. Se menciona por parte de (Escobar Mejía , Marín Hurtado, & Rave Restrepo) y (Rivera Sierra R. , 2014) que por más de 100 años la principal fuente de iluminación fueron las lámparas incandescentes, las cuales funcionaban por la emisión de luz a través del calentamiento de un filamento; más adelante aparecieron las bombillas de descarga de gas, que generan radiación en el espectro visible usando un arco controlado en un medio gaseoso ya sea de mercurio, sodio o halogenuros metálicos; posteriormente, surgen las bombillas de inducción, que a través de una corriente inducida excitan los átomos de mercurio dentro de la bombilla, que se transforma en radiación de espectro visible usando fósforo amarillo; y actualmente, con la aplicación de semiconductores se desarrollaron los diodos emisores de luz (LED) los cuales funcionan liberando energía en forma de fotones.

A mediados del siglo pasado se comercializaron nuevas tecnologías de iluminación con mejores características (mayor vida útil y menores costos) que las lámparas incandescentes lo que provocó su rápido desplazamiento en el mercado de luminarias. La iluminación LED y fluorescente presentan mayores ventajas frente a las lámparas incandescentes, (Cheng & Cheng, 2006) y (Yam & Hassan, 2005) describen que esta tecnología de iluminación cuentan con una mejor durabilidad, mayor eficiencia y mejor intensidad luminosa.

Más adelante, surgieron regulaciones de eficiencia energética a nivel mundial para el replazo de tecnologías pasadas y debido a esto muchas ciudades replazaron sus fuentes de iluminación por tecnología LED (Brusil Guamán, 2020). Para el año 2014, el 19% del consumo de energía a nivel mundial provenía de este tipo de tecnología, mientras que en América Latina este valor ronda el 24% (A. Burton, 2017).

En México, se estableció la norma NOM-028- ENER–2010, donde a partir de esta se eliminó gradualmente del mercado las lámparas incandescentes con el objetivo de reducir el consumo de energía, ahorrar millones de pesos en subsidios y reducir las emisiones de CO₂.

Las cargas no lineales son cada vez más usadas, pero llevan consigo desventajas relacionadas con la calidad de la energía, llegan a causar problemas por parte del suministro hacia el usuario y viceversa. En los últimos años se le ha dedicado atención a tratar los distintos problemas provocados por la degradación de la calidad de la energía eléctrica, ya que no ser tratados genera un incremento en la pérdida de energía. Las cargas no lineales, como menciona (Cunill Solà, 2017), demandan corrientes no sinusoidales y, debido a la impedancia de cortocircuito de la red, provocan la aparición de armónicos de tensión en el punto de conexión.

En el caso de la tecnología de iluminación LED, su funcionamiento depende del consumo de corriente en pulsos generados por un componente que funciona con electrónica de potencia llamado controlador.

Por esto mismo, se han desarrollado investigaciones en torno a los armónicos, ocasionada por la inclusión masiva de equipos electrónicos, que han contribuido al incremento de ondas con frecuencias altas en la red de suministro de energía eléctrica.

1.2 Planteamiento del Problema

El incremento en el uso de luminarias fluorescentes y LED, por sus ventajas de ahorro de energía, pueden llegar a introducir distorsión armónica en la red eléctrica. En el caso de las luminarias fluorescentes es causado por sus balastos electrónicos, mientras que en las LED es producida por los drivers (controlador del dispositivo).

El mayor problema de las lámparas con electrónica, como explican (Barbosa Franco, Noguera Vega, & Giral Ramírez, 2017) es que algunas luminarias LED no cumplen con la normativa en los límites de distorsión armónica y es causado por un mal diseño en el controlador en consecuencia, llegan a ser un mayor problema y aún más cuando operan de forma ajustable en la intensidad de iluminación.

Un ejemplo de esto, se puede observar en los resultados de la Tabla 1, donde se evaluaron los niveles de armónicos de distintas lámparas por (Uddin, Shareef, Mohamed, & Hannan, 2012) los resultados muestran los niveles altos de distorsión armónica de corriente (THDi)

Tabla 1. Resultados del análisis espectral de lámparas LED

| Lámpara examinada | Armónica (%) | | | | |
|----------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | 3 ^{era} | 5 ^{ta} | 7 ^{ma} | 9 ^{na} | THD _i |
| Philips 4W | 34.61 | 6.28 | 22.27 | 18.94 | 63.05 |
| Osram 6W | 91.96 | 77.05 | 58.51 | 41.01 | 174.3 |
| Evenzo 3W | 90.7 | 77.34 | 58.59 | 45.32 | 164.35 |
| Bright 5W | 86.65 | 75.92 | 61.75 | 48.87 | 167.2 |

Fuente: Uddin et al. 2012

En el plantel de San Lorenzo Tezonco (SLT) se realizó un cambio de las luminarias fluorescentes por luminarias LED como parte del programa de servicio social “Programa de optimización del sistema de iluminación del Plantel San Lorenzo Tezonco” durante los meses de noviembre 2021 a abril 2022. Por lo que se consideró realizar un análisis y tener conocimiento de los niveles de distorsión armónica dentro del sistema eléctrico que alimenta la iluminación del edificio A.

Un análisis de calidad de la energía nos ayuda a tener un conocimiento del estado del sistema eléctrico del edificio para conocer a detalle algún efecto adverso que genere afectaciones en un futuro a los equipos del sistema y a los usuarios del edificio. Considerando que los edificios restantes del plantel San Lorenzo Tezonco son similares al estudiado, podemos adelantarnos a un problema general en el plantel.

Cabe señalar que el edificio A es el que más consume energía en todo el plantel, con aproximadamente 36,547 kWh/mes (Programa de energía de la UACM, 2009). Donde, en conjunto con los otros dos edificios (B y C), el sistema automático de iluminación consume cerca del 90% de la energía del plantel.

1.3 Justificación

Si bien la generación de armónicos por una sola luminaria sea LED o fluorescente no llega a niveles que excedan lo permitido, si se puede genera un problema cuando al estar conectadas varias en una misma red entonces, las armónicas resultantes pueden llegar a ser significativas generando problemas con el uso constante (A. Mansoor, 1995).

De información previamente recopilada sabemos que el sistema de iluminación del edificio A está integrado de 708 luminarias, con 2 lámparas cada una, lo que resulta en un total de 1,416 lámparas. Para identificar las posibles afectaciones que pueden producir en el sistema eléctrico del plantel, se realiza un estudio de la calidad de la energía del sistema de iluminación, con las lámparas fluorescentes y LED (véase Tabla 2).

Tabla 2. Censo de iluminación Edificio A, antes y después del cambio de tecnología

| Descripción del sistema de iluminación | Potencia unitaria (W) | Número de Luminarias | Potencia total (kW) | Horas de operación (h/mes) | Energía consumida (kWh/mes) |
|---|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Luminarias con 2 lámparas fluorescentes T8 de 32 W con balastro electrónico ^{1/} | 66.5 | 708 | 47.082 | 388 | 18,267.81 |
| Luminarias con 2 lámparas LED T8 de 18 W ^{2/} | 36 | 708 | 25.488 | 388 | 9,889.34 |

^{1/} Balastro electrónico atenuable marca Lutron, con Factor de balastro 1.0, a 277 V, Factor de potencia superior a 0.95. Distorsión armónica total (THD) típica menor de 10% (Anexo A).

^{2/} Tubos LED Essential T8 marca Philips a 100 – 277 V, con Factor de potencia nominal de 0.9. Distorsión armónica total (THD) de 16% a 277 V y 60 Hz (Anexo B).

Debido a que no se cuenta con un estudio previo que especifique sí el sistema de iluminación del plantel es o no un problema de generación de armónicos, se lleva a cabo el análisis de los niveles de armónicos, distorsión armónica total y del factor de potencia en el edificio A del plantel San Lorenzo Tezonco, donde el mayor consumo de energía es por parte del sistema de iluminación.

El no tener conocimiento de los niveles de armónicos producidos por el sistema de iluminación representa un riesgo dado que puede generar incidencias en un futuro al sistema eléctrico del plantel, ya sea por calentamiento de los conductores, mal funcionamiento o avería de los equipos conectados, lo que eventualmente afectara a los usuarios del edificio y a otros usuarios del sistema. Adicionalmente, esto podría conducir a una sanción económica a la Universidad si se incumple con los parámetros establecidos en el Código de Red (CRE, 2016).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar las variaciones en la distorsión armónica al sustituir las lámparas fluorescentes con balastro electrónico por lámparas con tecnología LED en el sistema de iluminación del edificio A ubicado en el plantel San Lorenzo Tezonco de la UACM, tomando en cuenta las recomendaciones normativas nacionales e internacionales.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre la normativa aplicada a los niveles de distorsión armónica para sistemas de iluminación LED y fluorescente.
- Realizar mediciones de los parámetros eléctricos de la calidad de la energía eléctrica del sistema de iluminación en el edificio A, antes de la sustitución de la tecnología fluorescentes y después de instalar la tecnología LED.
- Analizar los datos obtenidos realizando una muestra gráfica con resultados de los porcentajes de distorsión armónica total (en tensión y corriente) y por componente armónico individual.
- Evaluar la distorsión armónica producida por las lámparas fluorescentes y las lámparas LED en el sistema eléctrico del edificio; con base a las recomendaciones normativas CFE L000-45 y UNE-IEC 61000-3-2.
- Identificar si los valores del factor de potencia cumplen con la normativa actual aplicable.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Calidad de la energía eléctrica

La calidad de la energía ha tenido relevancia en los años recientes debido a complejo sistema y los equipos integrados que son sensibles a las perturbaciones eléctricas. (Angel Silva & Ordoñez Plata, 2005) menciona que el término “Power Quality” se valora a partir de parámetros como la amplitud, la frecuencia, la forma de onda y la simetría de las señales de tensión y de corriente.

La IEEE 1159 - 2019 clasifica a los fenómenos electromagnéticos para que sea una forma accesible de solucionar los problemas de calidad de la energía. Analizando las diferentes soluciones disponibles para cada categoría listada en la Tabla 3, la importancia de esta clasificación por eventos y fenómenos electromagnéticos es que permiten un mejor análisis.

Tabla 3. Categoría y características de los fenómenos electromagnéticos en los sistemas de potencia

| Categorías | Contenido espectral típico | Duración típica | Magnitudes de tensión típicas |
|--|----------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 1.0 Transitorios | | | |
| 1.1 Impulso | | | |
| 1.1.1 Nanosegundos | 5 ns | < 50 ns | |
| 1.1.2 Microsegundos | 1 μs | 50 ns – 1 ms | |
| 1.1.3 Milisegundos | 0.1 ms | > 1 ms | |
| 1.2 Oscilatorios | | | |
| 1.2.1 Baja frecuencia | < 5 kHz | 0.3–50 ms | 0–4 pu |
| 1.2.2 Media frecuencia | 5–500 kHz | 20 μs | 0–8 pu |
| 1.2.3 Alta frecuencia | 0.5–5 MHz | 5 μs | 0–4 pu |
| 2.0 Variaciones de corta duración (rms) | | | |
| 2.1 Instantáneos | | | |
| 2.1.1 Sag | | 0.5 – 30 ciclos | 0.1–0.9 pu |
| 2.1.2 Swell | | 0.5 – 30 ciclos | 1.1–1.8 pu |
| 2.2 Momentáneos | | | |
| 2.2.1 Interrupción | | 0.5 ciclos – 3s | < 0.1 pu |

| | | | |
|---|-------------|-----------------|-------------|
| 2.2.2 Sag | | 30 ciclos – 3 s | 0.1– 0.9 pu |
| 2.2.3 Swell | | 30 ciclos – 3 s | 1.1–1.4 pu |
| 2.2.4 Desequilibrio de tensión | | 30 ciclos – 3 s | 2%–15% |
| 2.3 Temporales | | | |
| 2.3.1 Interrupción | | >3 s – 1 min | < 0.1 pu |
| 2.3.2 Sag | | >3 s – 1 min | 0.1–0.9 pu |
| 2.3.3 Swell | | >3 s – 1 min | 1.1–1.2 pu |
| 2.3.4 Desequilibrio de tensión | | >3 s – 1 min | 2%–15% |
| 3.0 Variaciones de rms de larga duración | | | |
| 3.1 Interrupción, sostenida | | > 1 min | |
| 3.2 Subtensiones | | > 1 min | 0.0 pu |
| 3.3 Sobretensiones | | > 1 min | 0.8–0.9 pu |
| 3.4 Sobrecarga de corriente | | > 1 min | 1.1–1.2 pu |
| 4.0 Desequilibrio | | | |
| 4.1 Tensión | | estado estable | 0.5-5% |
| 4.2 Corriente | | estado estable | 1.0-3.0% |
| 5.0 Distorsión de onda | | | |
| 5.1 Desfase en CC | | estado estable | 0–0.1% |
| 5.2 Armónicos | 0–9 kHz | estado estable | 0–20% |
| 5.3 Interarmónicos | 0–9 kHz | estado estable | 0–2% |
| 5.4 Muecas | | estado estable | |
| 5.5 Ruido | Banda ancha | estado estable | 0–1% |
| 6.0 Fluctuaciones de Tensión | < 25 Hz | intermitente | 0.1–7% |
| | | | 0.2–2 P |
| 7.0 Variaciones de Frecuencia de Potencia | | < 10 s | ± 0.10 Hz |

Fuente: IEEE Std 1159 -2019

De acuerdo con el estándar IEEE Std 1159 – 2019 (IEEE Std 1159-2019, 2019) la distorsión en las formas de onda es una desviación en el estado estable de una sinusoide de frecuencia de potencia ideal, caracterizada por el contenido espectral de la desviación. Donde podemos encontrar fenómenos como desplazamientos de CD, armónicos, interarmónicos, muescas y ruido.

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 eléctrica. 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).

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).

La Comisión Reguladora de Energía (CRE) es el organismo encargado de establecer los criterios técnicos para mantener el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en condiciones eficientes y asegurar de no exceder los límites operativos en post-disturbios. Por medio de la resolución Núm. RES/550/2021, conocida como el Código de Red, se establecen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, seguridad y sustentabilidad para asegurar que el suministro de electricidad sea seguro y de calidad.

Dentro del Código de Red se establecen los requerimientos técnico-operativos mínimos que están obligados a cumplir los usuarios del SEN, como lo son los centros de carga, y que se basa en la especificación de CFE L0000-45 “Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica” y donde se señala que está basada en la norma IEEE 519 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia” donde se encuentra definidos los valores máximos de distorsión permisible (Victor Guevara Del Ángel, s.f.).

Otro requerimiento importante exigido por la CRE hacia los consumidores con una demanda contratada mayor a 1 MW es el mantener un Factor de Potencia (FP) en un rango de entre 0.95 en atraso y 1.0 en el punto de conexión. Esta exigencia se debe a que tener un FP debajo del 95% implicaría un mal funcionamiento en el SEN y lo ideal es que el sistema sea lo más eficiente posible asegurando la calidad y confiabilidad del SEN. Cabe mencionar que adicionalmente a lo que exige el Código de Red, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como compañía suministradora, realiza un recargo a los usuarios que presenten un bajo FP en el periodo de facturación.

2.2 Factor de Potencia

Todas las cargas predominantemente inductivas requieren potencia activa (P) para realizar el trabajo real y potencia reactiva (Q) para generar el campo magnético. Esta potencia reactiva es necesaria para que el equipo funcione, pero impone una carga indeseable en el suministro, lo que hace que la corriente esté desfasada respecto de la tensión (Kabir et al, 2017).

$$FP = \frac{P \text{ [kW]}}{S \text{ [kVA]}} \quad (1)$$

$$FP = \cos \varphi \quad (2)$$

La ecuación (1) resume al factor de potencia como la relación de la potencia activa o efectiva y la potencia aparente de una instalación. Para el caso de tensión y corriente sinusoidales se puede emplear la ecuación (2), donde φ representa el ángulo desfasamiento entre tensión y corriente; para cargas lineales se considera el ángulo φ y su respectivo coseno como el FP de la carga (Martínez Sarmiento & Gómez Molano, 2004).

El efecto que tienen los armónicos sobre el factor de potencia es el de disminuirlo, ya que aumenta la potencia aparente total. El factor de potencia en presencia de armónicos está dado por

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{(V_{rms})(I_{rms})} = \frac{P}{(V_{rms}) \left(\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \right)} \quad (3)$$

donde

V_{rms} = Tensión eficaz

I_{rms} = Corriente eficaz

P = Potencia activa

S = Potencia Aparente

I_n = Corriente de orden armónico n

En las cargas lineales se considera el ángulo φ y su respectivo coseno como el FP de la carga, ver Figura 1. Sin embargo, el FP de cargas no lineales incluye un factor de distorsión (Figura 2) que es la relación entre el armónico fundamental y el valor eficaz (RMS) de la onda de (Martínez Sarmiento & Gómez Molano, 2004).

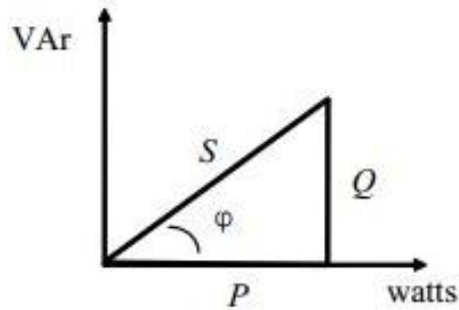


Figura 1. Triángulo de potencias para sistema senoidal
Fuente: Madrigal Martínez (s.f.)

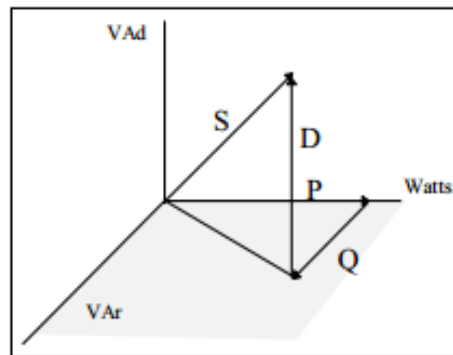


Figura 2. Triángulo de potencias para sistemas no senoidales
Fuente: Madrigal Martínez (s.f.)

En sistemas no senoidales se utiliza la ecuación (4), donde el factor de potencia está dado por la multiplicación del factor de distorsión y el factor de desplazamiento; donde el factor de distorsión siempre será ≤ 1 . Esto significa que cuando la corriente es no senoidal, nunca se podrá tener un factor de potencia unitario.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{E_m I_1}{2} \cos \theta_1}{\frac{E_m \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}}{2}} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}} \cos \theta_1 \quad (4)$$

$$\frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2}} = \text{Factor de distorsión}$$

$\cos \theta_1 = \text{Factor de desplazamiento}$

2.3 Distorsión Armónica

En los sistemas de potencia se define a las armónicas como cambios en las ondas de corriente y tensión cuya onda sinusoidal cambia a una onda compleja. La especificación de CFE L0000 – 45 define a una armónica como una componente senoidal de una onda periódica no senoidal llamada fundamental, que tiene una frecuencia correspondiente a un número múltiplo entero de la onda de frecuencia fundamental (60 Hz para el caso de México).

Otros autores, como (Herrera, 1997), definen que “una función periódica no sinusoidal, que puede ser descompuesta en la suma de funciones sinusoidales, estas funciones adicionales son conocidas como componentes armónicas”.

Otra manera de entender a las armónicas es como lo describe el teorema de Fourier, de acuerdo a (Téllez, 2012) “bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones senoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada como fundamental, Figura 3b, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental”. De la ilustración que presenta en la Figura 3a, se observa una onda que no es senoidal ya que es el resultado de la suma de otras ondas de distintas frecuencias múltiplos de la onda pura, que, de acuerdo al teorema de análisis matemático de Fourier, se dice que la onda viene “contaminada” con componentes armónicas. En la Figura 3c se observa la 5^{ta} armónica cuya frecuencia es de 300 Hz. Finalmente, en la Figura 3d se observa la 11^{va} armónica que tiene una frecuencia de 660 Hz.

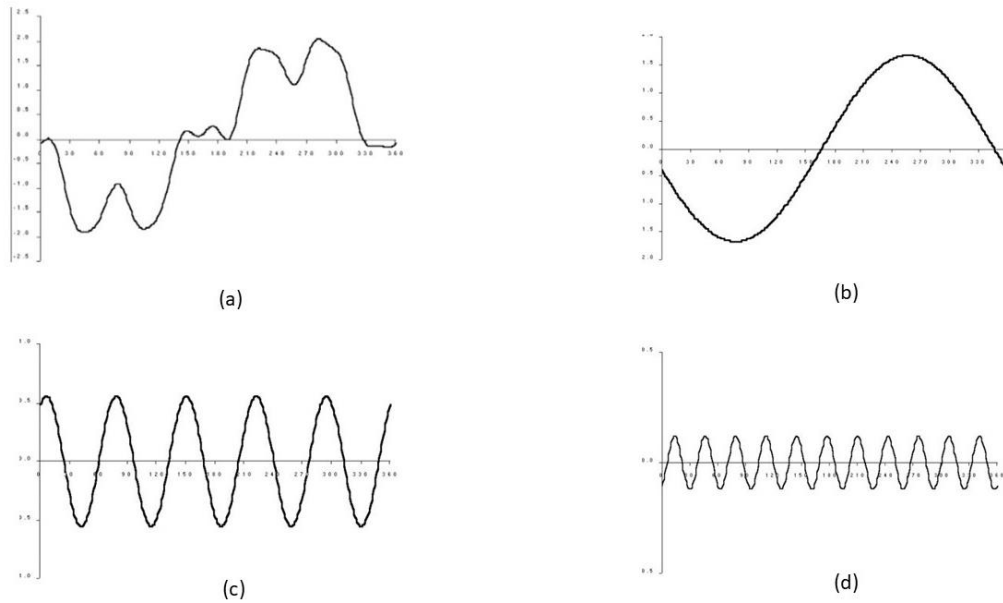


Figura 3. Señal y sus componentes armónicas: a) Función Original. b) Componente Fundamental. c) 5^{ta} Componente Armónica. d) 11^{va} Componente Armónica
Fuente: Téllez (2012)

2.3.1 Secuencia de las armónicas

En lo que respecta a los sistemas trifásicos, su funcionamiento se debe a que los generadores eléctricos están compuestos por tres arrollamientos en su estator, los cuales se encuentran desplazados en 120° eléctricos cada uno y originan un sistema de tres tensiones senoidales llamadas fases y si el sistema se encuentra balanceado es porque cada tensión senoidal es de la misma magnitud. Como menciona (FCEIA, 2015) la secuencia de fases es el orden temporal en que las tensiones alcanzan su valor máximo. Para la secuencia positiva se considera en orden A-B-C, mientras que la secuencia negativa tiene un orden A-C-B. Si las tensiones estuvieran en fase en el tiempo, sus fasores coincidirían y el sistema se denominaría de secuencia nula.

En el caso de las armónicas, al ser su frecuencia múltiplo de la fundamental, presentan ángulos de desfase distintos a la de la onda fundamental por lo que tienen distintas secuencias de fase. Las armónicas se pueden clasificar de acuerdo a su secuencia por lo que pueden ser de secuencia positivas (V_{a1} , V_{b1} , V_{c1}) misma secuencia de fases que el sistema original,

secuencia negativa (V_{a2} , V_{c2} , V_{b2}) invertida con respecto al sistema original y secuencia cero donde tienen la misma magnitud y no hay desfaseamiento (ver Figura 4).

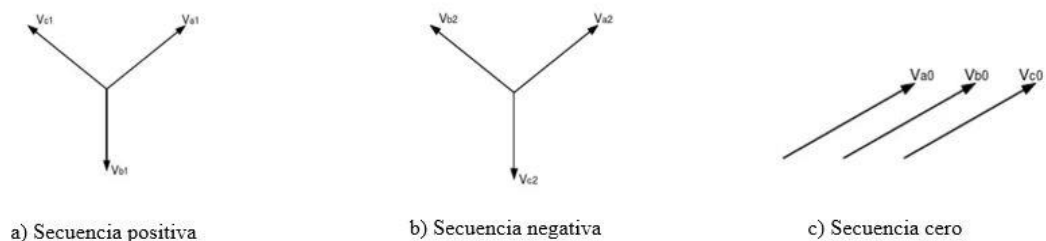


Figura 4. Secuencias de fase
Fuente: Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura FCEIA. (2015)

En la Tabla 4 se presenta la secuencia de fase de acuerdo al orden armónico. Se observa que la primera armónica es de secuencia positiva, la segunda armónica es de secuencia negativa, la tercera armónica es de secuencia cero, la cuarta armónica vuelve a ser de secuencia positiva y así consecutivamente con las armónicas de orden posterior.

Tabla 4. Secuencia de armónicos

| | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Orden | 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° |
| Frecuencia | 60 Hz | 120 Hz | 180 Hz | 240 Hz | 300 Hz | 360 Hz |
| | 50Hz | 100 Hz | 150 Hz | 200Hz | 250 Hz | 300 Hz |
| Secuencia | + | - | 0 | + | - | 0 |
| Orden | 7° | 8° | 9° | 10° | 11° | ... |
| Frecuencia | 420 Hz | 480 Hz | 540 Hz | 600 Hz | 660 Hz | ... |
| | 350 Hz | 400 Hz | 450 Hz | 500 Hz | 550 Hz | ... |
| Secuencia | + | - | 0 | + | - | ... |

Fuente: Manual Fluke 434-II

Cabe señalar que la secuencia armónica positiva, negativa y cero solo se presentan en sistemas trifásicos de 4 hilos (tres fases y neutro); por lo que, en caso de sistemas trifásicos sin neutro, solo se presentan corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa (AGN Group, (s.f.)).

En las armónicas de secuencia positiva se genera un campo magnético en la dirección de rotación de los motores (Proaño Pérez & Velasquez, 2010), provocando una mayor velocidad, por lo que estas ondas pueden producir calentamiento en los conductores del motor (Acevedo Donoso, s.f.).

Las armónicas de secuencia negativa generan un campo magnético en dirección opuesta a la rotación de los motores, lo que reduce el torque del motor y aumenta la demanda de corriente para una carga dada, estas armónicas provocan que el motor funcione lentamente (FLUKE, 2012).

Las armónicas de secuencia cero no provocan un campo magnético rotacional. Sin embargo, si se trata de cargas monofásicas no lineales, como lo son los sistemas de iluminación, los armónicos de secuencia cero: 3°, 6°, 9°, etc., no se anulan en el neutro, sino que, por el contrario, se suman en dicho conductor, lo que puede provocar un sobrecalentamiento excesivo del neutro, dado que éste no se dispone de un interruptor que limite la corriente, como sucede con los conductores de fase (AGN Group, (s.f.)).

2.3.2 Causas de la distorsión armónica

Las armónicas surgen de las cargas no lineales conectadas a la red. Las cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión senoidal absorben una intensidad de corriente no sinusoidal, pudiendo estar desfasada un ángulo φ respecto a la tensión (Proaño Pérez & Velasquez, 2010).

Las cargas más comunes que generan armónicos son las siguientes (Cunill Solà, 2017).

- Equipos electrónicos
 - Variadores de velocidad/frecuencia
 - Rectificadores o convertidores C.A. / C.C.
 - Dispositivos electrónicos de control y mando que regulan la intensidad absorbida
 - Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI)
 - Ordenadores y otros equipos electrónicos con fuentes de alimentación conmutadas

- Lámparas Fluorescentes compactas con balastro electrónico
- Lámparas tipo LED
- Dispositivos con arcos de descarga
 - Soldadura por arco
 - Hornos de inducción y de arco
 - Lámparas de descarga con balastro magnético (vapor de mercurio, de sodio, bajo consumo, fluorescentes, etc.)

Dispositivos trabajando en saturación

- Motores y transformadores
- Lámparas de descarga con inductancias saturadas

2.3.3 Efectos de la distorsión armónica

El efecto de los armónicos sobre los equipos depende de la naturaleza de estos, así como de la magnitud, frecuencia y fase de los mismos. Algunos de los efectos más importantes son los siguientes (M. Gruz):

- Los capacitores y transformadores sufren pérdidas adicionales y calentamientos que reducen su vida media de funcionamiento.
- Los fusibles de protección sufren calentamiento e incluso fusión en condiciones de intensidad normal.
- Los cables sufren fallos en el aislamiento, gradientes de tensión elevados y efecto corona
- Los balastos inductivos que se utilizan en lámparas fluorescentes o lámparas de descarga experimentan aumentos de temperatura y aparición de ruido y vibraciones.
- Disparos intempestivos de los interruptores diferenciales debido a corrientes armónicas de frecuencias elevadas que se derivan a tierra.
- En sistemas electrónicos de comunicaciones, computadores y equipos electrónicos de control de procesos como micro controladores, autómatas y robots, sus fuentes de generación de corriente continua a partir de la corriente alterna de la red eléctrica

están diseñadas y construidas suponiendo que no se produzcan tensiones armónicas por encima de determinados niveles. Sin embargo, cuando se superan dichos niveles se puede producir pérdida de datos o aparición de datos erróneos, así como operaciones fuera de secuencia en robots y máquinas herramienta controlados por computador.

- En los equipos de medida por inducción se producen errores de medida ya que habitualmente están calibrados para una onda de tensión sinusoidal sin presencia de tensiones armónicas.
- Los sistemas de transmisión de señales por la red pueden ser alternados por frecuencias armónicas próximas al valor de la frecuencia de la señal portadora utilizada en la transmisión
- En las propias redes eléctricas los armónicos incrementan sus pérdidas por calentamiento, especialmente en conductores neutros de baja tensión, transformadores y motores, ocasionando la degradación del aislamiento y acortando su vida útil.

2.3.4 Características de la distorsión armónica

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente debería encontrarse, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

Para que una señal se considere como distorsionada (Téllez, 2012) describe las siguientes condiciones para considerar una distorsión armónica:

- Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que a energía contenida es finita.
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o tensión.
- Permanente: Cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

2.3.5 Índices de las distorsiones armónicas

Los índices de distorsión armónica son una manera común de medir los problemas que hay en un sistema de potencia (Proaño Pérez & Velasquez, 2010), describen que mediante la distorsión armónica total (THD), ya sea para la tensión y para la corriente, se puede identificar la fuente de las armónicas y diseñar como mitigarlas. Para encontrar la distorsión armónica total de tensión (THD_v) se usa la siguiente ecuación:

$$THD_v = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^k V_h^2} * 100\% \quad (5)$$

donde

THD_v = Distorsión armónica total de tensión.

V_h = Valor individual de tensión de cada componente armónica.

V_1 = Valor de tensión fundamental.

h = Número del armónico.

k = Número del armónico máximo.

En el caso de la distorsión armónica total de corriente (THD_i) se emplea la siguiente ecuación:

$$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^k I_h^2} * 100\% \quad (6)$$

donde

THD_i = Distorsión total armónica de corriente.

I_h = Valor individual de corriente de cada componente.

I_1 = Valor de corriente fundamental.

h = Número del armónico.

k = Número del armónico máximo.

Donde el factor k debe llegar a ser 25 como mínimo, de acuerdo a (Especificación CFE L0000-45 Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2005).

2.3 Cargas no lineales

Desde los años ochenta, en el campo de las armónicas, en los sistemas eléctricos de potencia han avanzado en el ámbito internacional sobre técnicas y estudios sobre problemas de armónicos y en particular se ha dedicado más atención al análisis y modelización de las cargas no lineales. Estas cargas se pueden clasificar en tres categorías (Gómez Expósito, 2002), (Arrillaga, 2003), (Boix, 1996).

- Basados en arcos de descargada: lámparas de descarga, soldadores y hornos de arco;
- Basadas en inductancias saturables: reactancias para limitar arcos de descarga, transformadores y motores trabajando en saturación;
- Electrónicas: rectificadores monofásicos y trifásicos con filtro capacitivo, rectificadores trifásicos de 6 y 12 pulsos, cargadores de baterías, etc.

Una carga es no lineal cuando la corriente que ella absorbe no tiene la misma forma de onda que la tensión que la alimenta.

Existen muchos tipos de cargas no lineales que producen armónicos como los convertidores y los dispositivos de arco tales como: hornos de arco, impedancia de magnetización de transformadores y luces fluorescentes. Además, la corriente armónica ocasionada por las fuentes no lineales puede ocasionar la distorsión armónica en la tensión del sistema y ocasionar problemas en otros dispositivos (Proaño Pérez & Velasquez, 2010).

Los equipos fluorescentes y las lámparas LED son cargas eléctricas categorizadas como no lineales debido a la diferencia en la curva de corriente y tensión que estos generan durante el período de alterna.

2.4 Lámparas fluorescentes

En este tipo de lámparas la descarga se produce en vapor de mercurio a baja presión, donde la luz se consigue mediante polvos fluorescentes activados por la energía ultravioleta de la descarga (INDALUX, 2012). El bulbo de esta lámpara generalmente es tubular alargado y sellado en cada extremo por los terminales, su superficie está recubierta por una sustancia luminiscente y que determina la cantidad de luz emitida y la temperatura del color de la lámpara (Rivera Sierra R. , 2014).

Las partes que forman la lámpara fluorescente de acuerdo con (INDALUX, 2012) se enlistan a continuación:

- *Ampolla*: Normalmente hecha de vidrio de cal-soda suavizado con óxido de hierro que brinda cierto control de la transmisión ultravioleta de onda corta.
- *Revestimiento fluorescente*: Este determina las características de la lámpara, debido a que fija la temperatura del color (como consecuencia la apariencia del color), su índice de reproducción cromática (IRC) y en gran parte, la eficiencia lumínica de la lámpara. Son polvos de fósforo de tipo estándar, tri-fósforos o multi-fósforos.
- *Electrodos*: Son los elementos que poseen el material emitido para conducción eléctrica proporcionando los electrones necesarios para mantener la descarga.
- *Gas de relleno*: Mezcla de mercurio saturado y un gas inerte (argón o criptón).

Para el correcto funcionamiento de esta lámpara se hace necesario de un componente llamado balastro; que se representa en la Figura 5. La (IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-3-2., 2005) define a un balastro como un dispositivo conectado entre la red y una o más lámparas de descarga que sirve principalmente para limitar la corriente de la(s) lámpara(s) al valor requerido. Puede incluir medios para transformar la tensión y/o la frecuencia de la red, corregir el factor de potencia, y en combinación con un dispositivo de encendido, proporcionar las condiciones necesarias para encender la(s) lámpara(s).

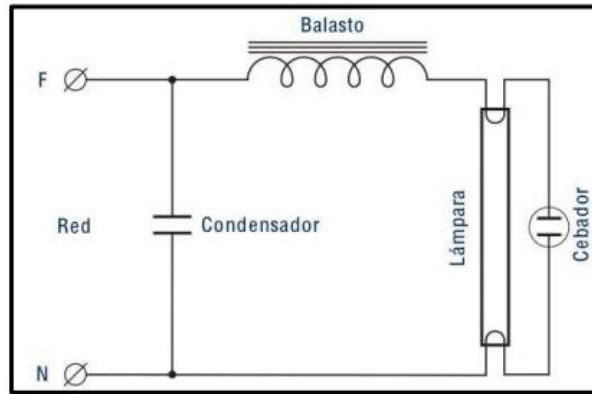


Figura 5. Esquema de arranque por balastro luminaria fluorescente
Fuente: INDALUX Manual luminotecnia 2012

Autores como (Salazar, 2012) y (Vincitorio, 2012), reconocen que los balastos tienen efectos negativos sobre la red eléctrica, indicando que “las lámparas fluorescentes con balastro electrónico usan la electrónica de potencia que opera en alta frecuencia, por lo que los armónicos generados también son de alta frecuencia”. Los balastos electrónicos para lámparas fluorescentes se pueden alimentar de dos formas:

Con corriente alterna (CA): Se conecta directamente a la línea eléctrica, por lo que estos sistemas tienen una etapa de rectificación, filtrado y corrección del factor de potencia, su estructura interna se muestra en la Figura 6 (Marquez Avedaño, 2005)

Con corriente directa (CD): en la actualidad estos sistemas tienen gran aplicación, puesto que son alimentados con energías alternativas, como la solar, considerada como fuente inagotable de electricidad. Estos sistemas son muy utilizados en casas de campo, zonas rurales alejadas de la línea de distribución o zonas de acceso remoto (Marquez Avedaño, 2005).

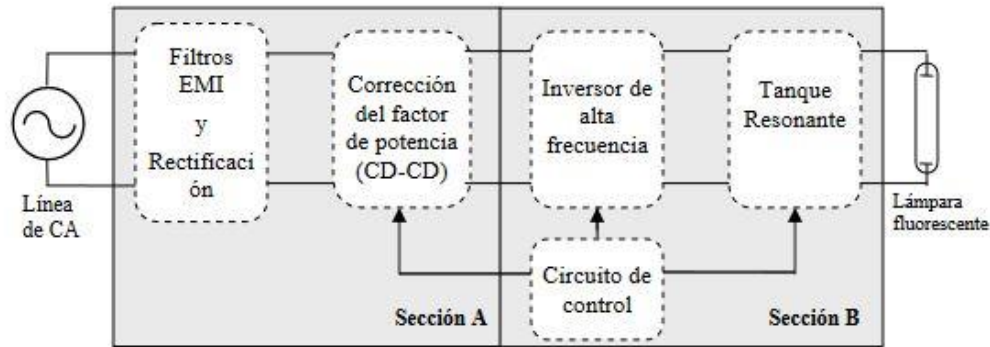


Figura 6. Partes de un balastro electrónico convencional
Fuente: Márquez, 2005

De acuerdo con (Puentes Iregui, 2004) en los balastros electrónicos se ha encontrado afectaciones a la calidad de potencia por generar corrientes armónicas de orden impar el 3, 5, 7, 9 y 11. Y otra afectación es al factor de potencia debido a que los balastros electrónicos son cargas no lineales y exigen una alta corriente de magnetización para su operación.

2.5 Lámparas de estado sólido de diodos de emisores de luz (LED)

Un LED es un dispositivo construido mediante la unión de dos materiales semiconductores. En (Blanco Castañeda, 2010) se explica el funcionamiento como un “dopaje N (exceso de electrones) y otro con dopaje P (exceso de huecos)” y que “al unir estos dos materiales se forma una barrera iónica donde no hay portadores libres y existe un intenso campo eléctrico” (Figura 7a). Si el diodo se polariza directamente una corriente de electrones fluiría desde la zona N a la zona P disminuyendo la barrera iónica (Figura 7b); en el caso contrario donde si se polariza inversamente la corriente no va a circular y la barrera iónica aumenta (Figura 7c). El diodo funciona como un interruptor que solo permite el paso de la corriente en una sola dirección, denominada de sentido directo e impide la circulación de corriente en sentido inverso (Márquez Avendaño, 2010).

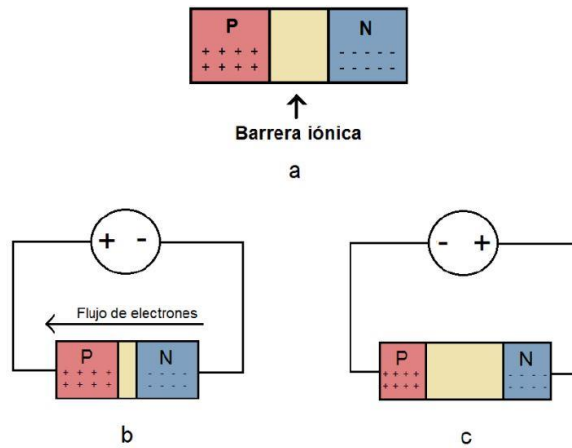


Figura 7. Diodo: a) Unión P-N. b) Polarización directa de la unión P-N. c) Polarización inversa de la unión P-N
Fuente: Blanco Castañeda, A. M. (2010)

La iluminación LED utiliza un tipo de conversión de energía alterna a energía continua por medio de un rectificador de onda completa (Wilkins, 2014); por lo tanto, utiliza drivers o convertidores que están compuestos por un circuito rectificador, un condensador de filtro, un convertidor DC-DC y un controlador de corriente constante (Lin, 2016). Los elementos que integran el controlador se muestran en la Figura 8. Por esto la problemática de la iluminación LED es que distorsionan la forma de onda de la corriente, lo que provoca caídas de tensión no sinusoidales, favoreciendo la aparición de distorsiones armónicas.

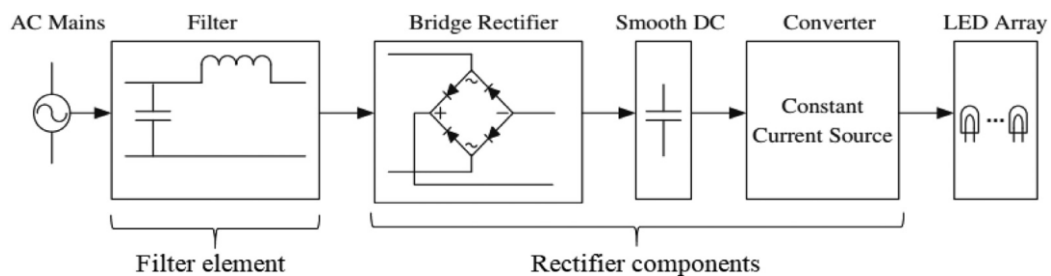


Figura 8. Diagrama de balasto Electrónico de Lámpara LED
Fuente: Megahed & Kotb, 2022

2.6 Normativa Aplicable

Debido a la gran cantidad de sistemas que trabajan con electrónica de potencia y se encuentran conectadas a la red eléctrica, es recomendado por autores como (Sarmiento, 2001) que se tenga en cuenta el grado máximo de influencia en la red por parte de los equipos que a ella se conectan.

Dentro de la normativa establecida se consultó la norma española sobre límites para emisiones de corriente armónica para equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase en un sistema de baja tensión que adopta la Norma Internacional IEC 61000-3-2.

La norma sugiere sobre el proceso en la realización del análisis y conexión del equipo para una adecuada medición de niveles de armónicas. Donde se recomienda que la conexión para equipo trifásico sea de acuerdo a la Figura 9.

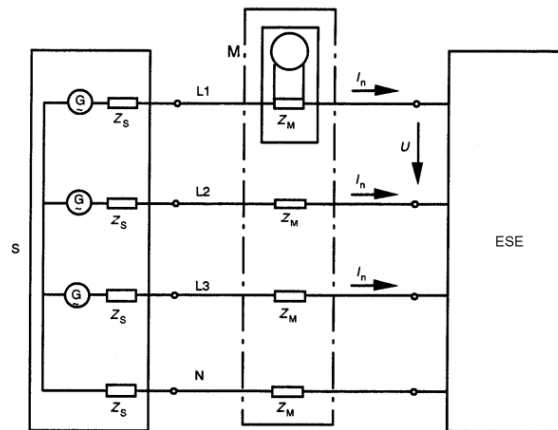


Figura 9. Circuito de medida para los equipos trifásicos
Fuente: IEC 61000-3-2 (2005)

donde

- S potencia de la fuente de alimentación
- M equipo de medida
- ESE equipo bajo análisis.
- G tensión a circuito abierto de la fuente de alimentación
- Z_M impedancia de entrada del equipo de medida

- Z_s impedancia interna de la fuente de alimentación
- In componente armónica de orden n de la corriente de línea
- U tensión de ensayo (tal y como se muestra en el ejemplo entre las fases L1 y L2)

Como el objeto de estudio de este proyecto se toma en cuenta al equipo de iluminación definido por la (IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-3-2., 2005):

Equipos con una función primaria de generación, regulación y distribución de radiación óptica por medio de lámparas incandescentes, lámparas de descarga o LED. Se incluyen:

- Lámparas y luminarias;
- La parte de iluminación de los equipos multifunción en los que una de las funciones primarias de este es la iluminación;
- Balastos independientes para lámparas de descarga y transformadores independientes de lámparas incandescentes;
- Equipos de radiación ultravioleta (UV) e infrarrojos (IR);
- Letreros publicitarios iluminados;
- Atenuadores para lámparas distintas de las incandescentes.

La norma IEC 61000-3-2:2005 clasifica al equipo de iluminación estudiado como de tipo “C” y por sus potencias:

- Potencia de entrada activa $>25W$

Para equipos de iluminación de descarga con atenuadores incorporados o que se componen de *dimmers* o atenuadores independiente construidos en un recinto, se aplicarán las siguientes condiciones:

- Los valores de corriente armónica para la condición de carga máxima derivada de los límites porcentuales indicados en la presente norma;
- En cualquier posición de regulación, la corriente armónica no deberá exceder el valor de corriente permitido en la condición de carga máxima;

- El equipo deberá ensayarse de acuerdo con las condiciones indicadas en la cláusula C.5 de la norma.
- Potencia de entrada activa ≤ 25 W

Los equipos de iluminación de descarga con una potencia de entrada activa inferior o igual a 25 W cumplirán con uno de los dos conjuntos de requisitos siguientes:

- Las corrientes armónicas no excederán los límites de potencia de la columna 2 de la Tabla 4, o;
- La corriente armónica de orden 3 no sobrepase el 86% y la amplitud de la corriente y la amplitud de la corriente armónica de orden 5 no debe sobrepasar el 61%; además, la forma de onda de la corriente de entrada debe ser tal que empiece a 60° o antes, que tenga su última cresta (si hay varias crestas por semiperiodo) a 65° o antes y que no se termine antes de 90° , asumiendo que el paso por cero de la fundamental de la tensión de alimentación es 0° . El umbral de corriente es del 5% del valor pico absoluto más alto que se produce en la ventana de medición, y las mediciones de ángulo de fase se realizan en el ciclo que incluye este valor de pico absoluto, como en la Figura 10.

Si el equipo de iluminación de descarga tiene un dispositivo de regulación incorporado, la medición se realiza únicamente en condiciones de plena carga.

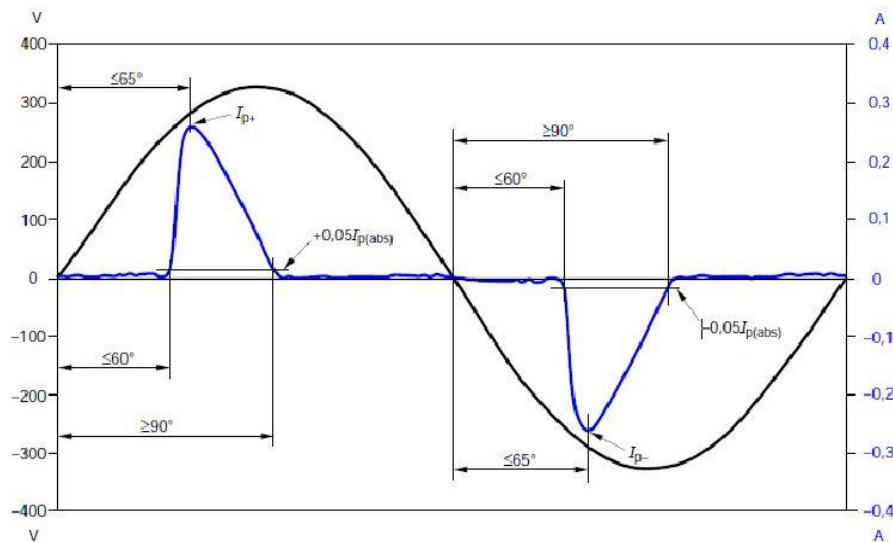


Figura 10. Ángulo de fase relativa y los parámetros de corriente descritos para equipos clase C
Fuente: IEC (International Electrotechnical Commission, 61000 3-2-. 2005)

Para efectos del presente proyecto se tomará en cuenta los límites establecidos para equipos de iluminación con una potencia de entrada activa ≤ 25 W, las corrientes armónicas no deberán exceder lo establecido en la norma IEC 61000-3-2, cuyos límites se encuentran establecidos de igual manera en la especificación de CFE L000-45. Adicionalmente la presente norma solo aplica para las corrientes de línea y no para las corrientes en el conductor de neutro.

Tabla 5. Límites de armónicas para equipos de clase C

| Armónicos [n] | Corriente armónica máxima permisible [A] | Corriente armónica máxima permisible por Watt [mA/W] |
|------------------|---|---|
| 3 | 2.3 | 3.4 |
| 5 | 1.14 | 1.9 |
| 7 | 0.77 | 1.0 |
| 9 | 0.44 | 0.5 |
| 11 | 0.33 | 0.35 |

Fuente: International Standard IEC 61000-3-2. (2014). Pp. 1-36

En México no se cuenta con una norma específica que mencione los límites de armónicas para equipo de iluminación. Dentro de la norma NOM-030- ENER-2016, Eficacia luminosa de lámparas de diodos emisores de luz (LED) integradas para iluminación general, se menciona que la distorsión armónica total debe ser igual o menor que lo marcado en el producto o empaque. Una lámpara de LED integrada puede marcarse como “baja distorsión armónica en corriente” o “ $THD_i < 30\%$ ” si la distorsión armónica que se mide es menor al 30%. Para el caso de las lámparas con potencia menor o igual a 25W, debe tener un factor de potencia mayor o igual a 0.5 y para potencias mayores a 25W, el factor de potencia debe ser mayor o igual a 0.7.

Los límites recomendados por la CFE L0000-45 relaciona a la tensión de alimentación y el índice de distorsión armónica. La Tabla 6 muestra los límites máximos permitidos de la distorsión armónica total de tensión (DATT, equivalente a THD en inglés) y el componente armónico individual máximo de tensión (CAIMT). Cabe destacar que los límites establecidos en el código de red están basados en la norma internacional IEEE Std

519-2022. El código de red aplica a los usuarios conectados a media y alta tensión: centros de carga (usuarios consumidores), generación e intermediación.

Tabla 6: Límites máximos de distorsión armónica total en tensión y de CAIMT en el punto de acometida

| Tensión kV | Componente armónico individual máximo de tensión (CAIMT) % | Distorsión armónica total de tensión (DATT) % |
|-------------|--|---|
| Menor de 1 | 6 | 8 |
| De 1 a 35 | 5 | 6.5 |
| Mayor de 35 | 2 | 3 |

Fuente: Especificación CFE L0000-45, Tabla 2

Los límites recomendados por la CFE L0000-45 para las armónicas de corriente, para consumidores a un nivel de tensión hasta 69 kV, se presentan en la Tabla 7. Los consumidores deben limitar el contenido armónico que generan en la corriente que demandan de acuerdo a su impedancia relativa; ésta se calcula con la relación entre la máxima corriente de corto circuito I_{cc} y la máxima corriente de demanda bajo operación normal.

Tabla 7. Distorsión armónica máxima permitida en corriente para baja, media y alta tensión hasta 69 kV

| Impedancia relativa (I_{cc}/I_L) | Componente armónico individual máximo de corriente, para armónicas impares (CAIMC) % | | | | | Distorsión armónica total de demanda (DATD) % |
|--------------------------------------|--|------------------|------------------|------------------|----------|---|
| | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h > 35$ | |
| $(I_{cc}/I_L) < 20$ | 4 | 2 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5 |
| $20 \leq (I_{cc}/I_L) < 50$ | 7 | 3.5 | 2.5 | 1 | 0.5 | 8 |
| $50 \leq (I_{cc}/I_L) < 100$ | 10 | 4.5 | 4 | 1.5 | 0.7 | 12 |
| $100 \leq (I_{cc}/I_L) < 1\ 000$ | 12 | 5.5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| $(I_{cc}/I_L) \geq 1\ 000$ | 15 | 7 | 6 | 2.5 | 1.4 | 20 |

Fuente: Especificación CFE L0000-45, Tabla 3

2.7 Medición de parámetros eléctricos y calidad de la energía

En la medición de los parámetros eléctricos de sistemas complejos comúnmente se usa un analizador de redes que nos permite conocer a detalle las medidas de corriente, tensión, consumo de energía y potencias, hasta los niveles de armónicos presentados en la tensión y corriente.

Los analizadores de redes son muy útiles para conocer el estado de la red eléctrica y que facilitan el mantenimiento de los mismos porque monitorean y registran en tiempo real los valores de tensión, corriente, potencias, frecuencia, factor de potencia, formas de onda y el consumo de energía, lo cual permite realizar un diagnóstico de las condiciones de operación en las instalaciones.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el analizador de redes de marca Fluke, modelo 343-II, que es el analizador con que cuenta el Programa de Energía. Este analizador de redes se encuentra clasificado por su rendimiento, en base a lo establecido en la norma (IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-3-2., 2005) como de tipo S: “Los niveles de precisión son menos estrictos y son dispositivos usados para encuestas estadísticas y aplicaciones contractuales cuando no se requiera una medición comparable” (Chauvin Arnoux, 2021).

Este dispositivo puede registrar información sobre THD, corriente de armónicos, corriente de factor K, tensión de armónicos, Watt de factor K, tensión de interarmónicos, corriente de interarmónicos, W_{rms} , A_{rms} y las componentes armónicas desde la 1^{era} armónica hasta la 50^{ava} armónica. El analizador de redes Fluke calcula el grupo de armónicas de tensión y corriente de 10/12 ciclos conforme a lo establecido en la norma IEC 61000-4-7. El analizador muestra las lecturas como porcentaje de la fundamental, como porcentaje de todos los armónicos combinados como valor rms. Los resultados se pueden visualizar en histograma y en una pantalla de tendencias (FLUKE, 2012).



*Figura 11. Analizador de redes eléctricas marca Equipo Fluke 435-II
Fuente: Imagen propia*

Capítulo III. Metodología

Para el presente trabajo se comenzó por realizar una investigación bibliográfica para una mejor comprensión del tema y con esta información se construyó el marco teórico a partir de los conceptos e ideas más relevantes para el caso de estudio.

Como siguiente paso de la investigación se recabó la normativa aplicable en México para los límites de distorsión armónica y que en dado caso sea aplicable a la tecnología LED y fluorescente. La estructura usada para el desarrollo de este trabajo se esquematiza en la Figura 12.

Para comenzar con el análisis de contenido armónico se instaló el analizador de redes de la marca Fluke 435-II en el tablero exclusivo de alumbrado ubicado dentro de la subestación del edificio A (Figura 13), el cual es alimentado por un transformador a 277 V entre fase y neutro (Figura 15).

El analizador de redes proporciona suficientes datos sobre los parámetros eléctricos provocados por las lámparas fluorescentes y las lámparas LED que permiten realizar el estudio de calidad de la energía en esta carga. Con la finalidad de analizar el comportamiento de las variables eléctricas ante las diferentes condiciones que se pueden presentar día con día, el analizador de redes se debe conectar y dejar registrando por al menos una semana.

Una vez se realiza la desconexión del analizador de redes, se realiza las descargas de los datos para el análisis de los datos obtenidos; se lleva a cabo con un programa que genere gráficos para facilitar la observación y comparación de los resultados obtenidos. Esta visualización facilita la interpretación de los valores obtenidos para evaluar si están dentro de los límites permitidos por la normativa que se consultó.

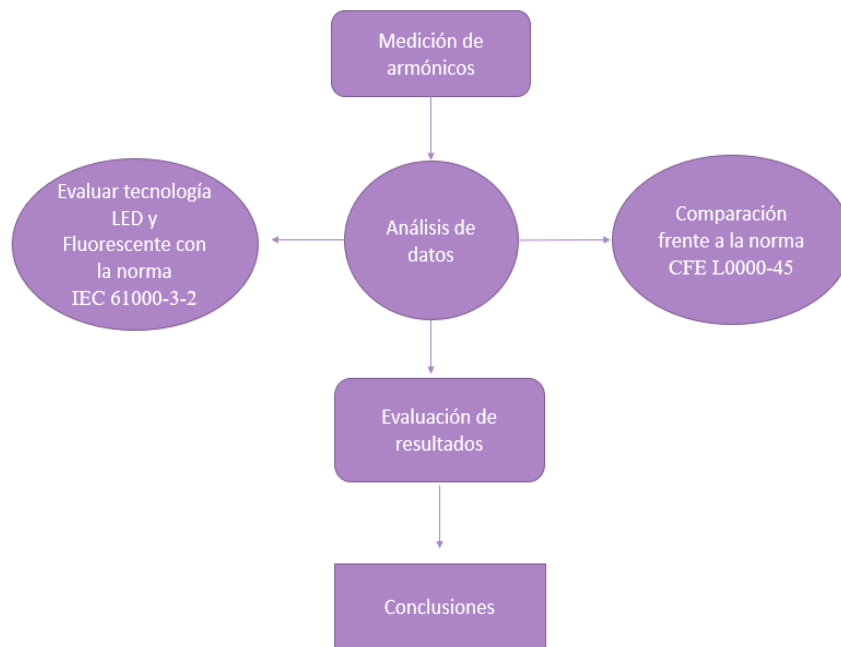


Figura 12. Diagrama de proceso para metodología aplicada
Fuente: Elaboración propia

3.1 Medición de parámetros eléctricos y de calidad de la energía

Para la obtención de datos se instaló el analizador de redes marca Fluke modelo 435-II proporcionado por el Programa de Energía de la UACM. El analizador de redes se configuró para la grabación de parámetros eléctricos y de calidad de la energía durante una semana, tomando mediciones en intervalos de 5 minutos; primero se instaló el equipo para la medición del sistema de iluminación cuando tenía lámparas fluorescentes durante el periodo de una semana en el mes de noviembre del 2021. Posteriormente, cuando ya se había realizado el cambio a tecnología LED, se instaló por una semana consecutiva para el mes de noviembre del 2024. El periodo de recopilación de datos fue seleccionado por recomendación de la especificación de CFE L0000-45 Apéndice A sección A.2 “En el caso de sistemas trifásicos, la medición registro debe hacerse en forma simultánea de las tres tensiones, de fase a tierra.” y sección A.4 “El periodo mínimo de monitoreo es de una semana”.

3.1.1 Parámetros de calidad de la energía registrados:

- Distorsión armónica total de corriente THD_i
- Distorsión armónica total de tensión THD_v

- Distorsión armónica de las componentes 2^{da} a la 11^{va}
- Factor de Potencia

3.1.2 Conexión del analizador de redes

La conexión del analizador de redes se realizó en un sistema trifásico de 4 hilos (Figura 13) y en orden a lo especificado en el manual y en la secuencia siguiente:

- Colocación de las pinzas amperimétricas alrededor de los conductores de fase A(L1), B(L2), C(L3) y N(neutro) cada una de acuerdo a la polaridad de señal correcta.
- Conexión de tensión: primero tierra, seguido por el neutro y más adelante la línea A(L1), B(L2) y C(L3)

Al hacer la conexión se comprobó que los valores medidos fueran correctos con la ayuda un amperímetro digital. La conexión del equipo de medición se realizó conforme a lo establecido en la IEC 61000-3-2:2018 para conexión en estrella del lado de la carga, en el devanado de alta tensión (Figura 13).

El analizador se conectó en el lado de alta tensión del transformador (elevador) que alimenta el sistema de alumbrado a 277 volts, que es el lado donde se encuentra conectada la carga. Al final la conexión en la instalación quedó como se muestra en la Figura 14.

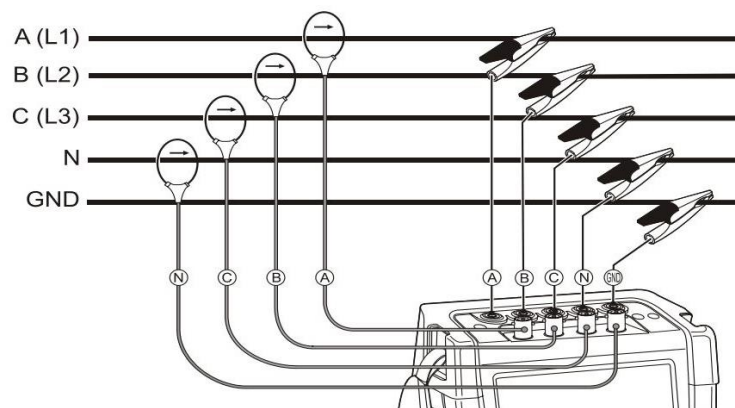


Figura 13. Conexión de un analizador a sistema de distribución trifásico
Fuente: manual de uso del Fluke 434-II

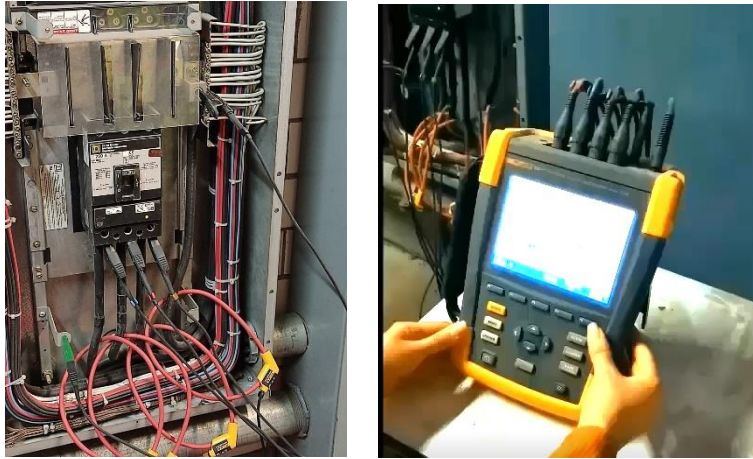


Figura 14. Conexión trifásica del analizador Fluke 435-II
Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Cálculo de la impedancia relativa

Para establecer los límites de armónicos en corriente de acuerdo con la normativa, es necesario obtener el dato de impedancia relativa para la comparación de los niveles de armónicas total y de las componentes armónicas hasta la onceava (Tabla 7). Se calculó la impedancia relativa en base a las siguientes ecuaciones y tomando en cuenta los datos del transformador cuya placa se presenta en la Figura 15 y sus datos en la Tabla 8.



Figura 15. Datos del transformador elevador (220 V a 480 V), que alimenta al tablero de alumbrado, edificio A
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Datos del transformador elevador ubicado en la subestación

| Datos del transformador que alimenta la iluminación en el edificio A | |
|--|------------|
| Modelo | 150T579HCU |
| Conexión | Y – D |
| Tensión entre fases (AT) | 480 V |
| Tensión entre fase y neutro (AT) | 277 V |
| Tensión entre fases (BT) | 220 V |
| % Impedancia | 4.21% |
| Potencia aparente | 150 kVA |

Fuente: Elaboración Propia

La corriente de corto circuito se obtuvo mediante la siguiente fórmula que requiere conocer los datos de la tensión entre fases del transformador, su impedancia y la potencia aparente.

$$I_{cc} = \left(\frac{S_3}{(\sqrt{3})(V_L)} \right) \left(\frac{100}{Z\%} \right)$$

$$ICC = \frac{150kVA}{(\sqrt{3})(480)} \left(\frac{100}{4.21} \right)$$

$$ICC = 4,285.6 \text{ A}$$

Para la corriente de línea se usó la tensión en línea.

$$IL = \frac{150kVA}{(\sqrt{3})(480 \text{ V})}$$

$$IL = 180 \text{ A}$$

Por lo que la impedancia relativa resultó de

$$\frac{ICC}{IL} = \frac{4,285.6}{180} = 23.76$$

Con este valor obtenido de la impedancia relativa y la información de la Tabla 6, podemos observar que para armónicas menores a la componente 11^{va} se permite hasta un 7%

de contenido armónico y hasta 3.5% para armónicas mayores a la 11^{va}, mientras que, en el caso de la distorsión armónica total de corriente se permite hasta 8%.

3.1.4 Sistema de iluminación con lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes, que inicialmente tenía el sistema de iluminación, son marca Phillips modelo F35T8-TL481. De acuerdo con su hoja de datos (Philips T8 Estándar) esta lámpara consume una potencia nominal de 32 W. Cada luminaria está compuesta de 2 lámparas alimentadas mediante un balastro electrónico; se tiene un total de 708 luminarias en el edificio A por lo que se tienen un total de 1416 lámparas. Los balastos son de la marca LUTRON los cuales operan a una tensión de 277 V, factor de potencia ≥ 0.95 , consumen en 66.5 W (con 2 lámparas de 32 W T8) y un THD de corriente típico de 10 % (Anexo A).

Para realizar las mediciones se instaló un analizador de redes durante un periodo en el cual la iluminación del edificio era totalmente por lámparas fluorescentes. El analizador fue configurado para la grabación de información en el periodo del 18 de noviembre del 2021 al 16 de diciembre del 2021, con el dispositivo Fluke 435-II configurado para obtener datos cada 5 min y para el registro de la siguiente información:

- Distorsión armónica total de corriente THD_i
- Distorsión armónica de tensión THD_v
- Distorsión armónica de las componentes múltiplos de 3
- Distorsión armónica de las componentes impares

3.1.5 Sistema de iluminación con lámparas LED

En el caso de la medición con el nuevo sistema de alumbrado con tecnología LED, se instaló el analizador de redes después del cambio total de lámparas fluorescentes. Cada lámpara LED trabaja con un driver que consumen 18W, 277 V, con factor de potencia de 0.9 y con un THD del 16% (Anexo B). El analizador fue configurado para la grabación de información en el periodo del 14 de noviembre del 2024 al 21 de noviembre del 2024, con el

dispositivo Fluke 434-II configurado para obtener datos cada 5min y para el registro de la siguiente información:

- Distorsión armónica total de corriente THD_i
- Distorsión armónica de tensión THD_v
- Distorsión armónica de las componentes múltiplos de 3
- Distorsión armónica de las componentes impares

Capítulo IV. Análisis de Resultados

Se realizó una recopilación de datos con base al equipo y configuración conforme a lo descrito en la metodología. Ahora se procede a realizar el análisis de la información obtenida para la iluminación fluorescente y LED; particularmente examinando el THD, factor de potencia y niveles de intensidad de los armónicos. Los datos fueron idóneamente ordenados para las respectivas comparaciones de forma que se visualice e identifique de forma simple qué tecnología genera mayores problemas de calidad de la energía y podría provocar inconvenientes en la instalación eléctrica de la Universidad.

4.1 Análisis de la Distorsión Armónica en tensión de las lámparas fluorescentes y LED

Para el análisis de los resultados se tomó en cuenta lo establecido por la normativa de CFE L0000-45 cuya información es equivalente a lo establecido en la IEC 61000-3-2 “*Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16^a per phase)*” y es adecuada para evaluar los niveles de armónicos para tecnología de iluminación en sistemas de cargas de baja potencia.

En la Tabla 9 se observa la comparación de los niveles de distorsión armónica total de tensión medidos en el punto de interconexión del sistema de iluminación del edificio A; se obtiene como resultado que hubo una disminución del 1.4% del THD_v en el neutro con la tecnología LED, pero para las líneas A, B y C hubo un incremento de THD_v de 0.17%, 0.50% y 0.32% respectivamente.

Tabla 9. Comparación de Distorsión Armónica Total de Tensión, Fluorescente - Led

| Distorsión Armónica Total de Tensión | | | |
|--------------------------------------|------------------|---------|-------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED-Fluorescente) |
| AN | 1.47 | 1.64 | +0.17 |
| BN | 1.23 | 1.73 | +0.50 |
| CN | 1.37 | 1.69 | +0.32 |
| NG | 38.28 | 36.88 | -1.40 |

Los valores de THD_v en cada una de las líneas mostrados en la Tabla 9, cumplen con la normativa de CFE L0000-45 que especifica que se tiene un valor máximo permitido de 8% en THD_v (Tabla 6), a excepción del neutro donde se sobrepasa el límite permitido para ambas tecnologías; 38.28% en el caso de las fluorescentes y un 36.88% para el caso de las LED.

En la Figura 16 se presenta de forma gráfica los promedios obtenidos para la tecnología de luminarias fluorescente y de LED, puede observarse que para cada línea de THD_v se encuentra por debajo del límite de CFE.

En la Figura 17 se presenta gráficamente el promedio total en neutro para THD_v está por arriba del permitido del 8% establecido por CFE, tanto para la tecnología Led (36.88%) como la fluorescente (38.28%)

En la Figura 18 se observa el THD_v en un día, en horario de la mañana cuando hay más actividad en las aulas, tienden a ser constantes con las lámparas con las lámparas fluorescentes y un poco variables con las lámparas LED, lo que indica un correcto funcionamiento de las lámparas. Se incluye el porcentaje de 8% THD_v establecido por el código de red para visualizar que los valores son insignificantes.

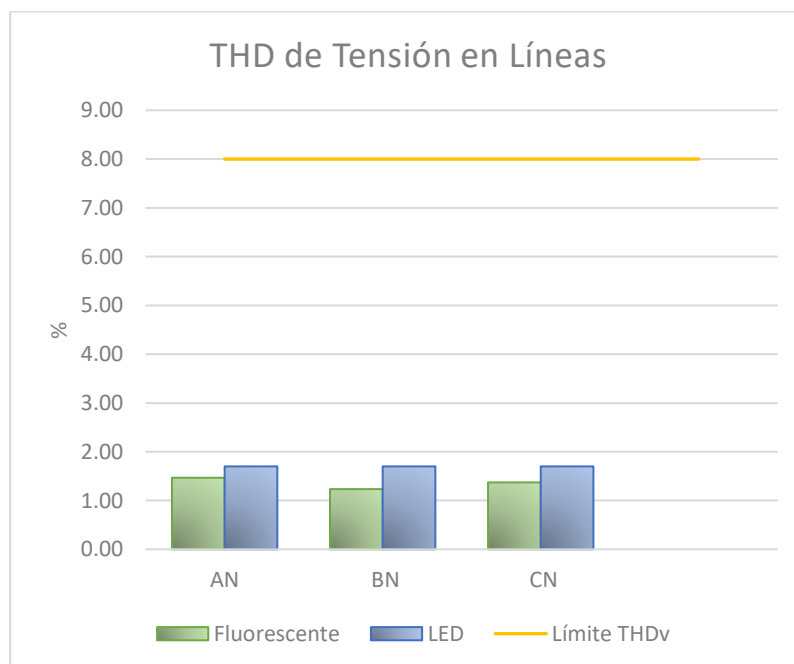


Figura 16. THD de tensión en líneas

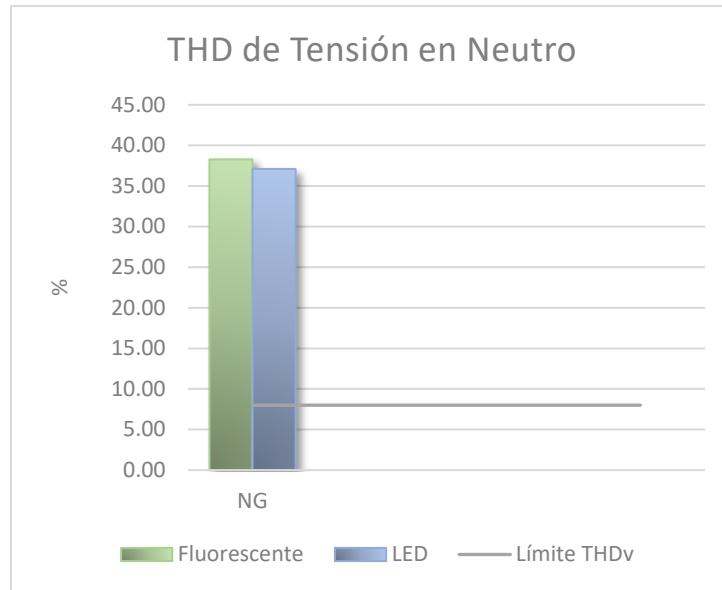


Figura 17. THD de tensión en el neutro

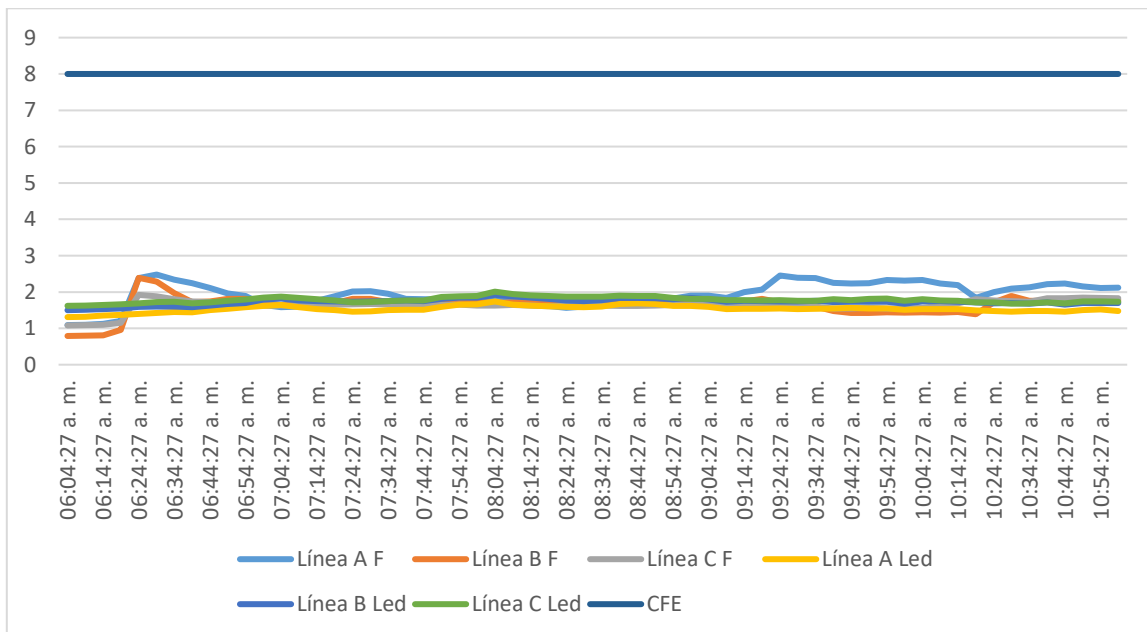


Figura 18. Variación de la Distorsión Armónica Total de tensión a lo largo del periodo de medición

4.2 Análisis de la Distorsión Armónica Total en Corriente de las lámparas fluorescentes y LED

Para el análisis de los niveles totales de corriente THD_i , se tomó en cuenta lo establecido en la especificación de CFE L0000-45 (información de la Tabla 7) que establece los niveles permitidos de corrientes armónicas total de demanda.

De la Tabla 10 se puede observar que hubo una disminución de los niveles de armónicos total para cada una de las líneas y del neutro con el uso de luminarias LED. A pesar del mejoramiento en los niveles de THD_i no se cumple al exceder el 8% (Tabla 7) de distorsión armónica total en corriente, tal y como lo especifica CFE L0000-45.

Tabla 10. Comparación de Distorsión Armónica Total en Corriente, Fluorescente - LED

| Armónica Total en Corriente | | | |
|-----------------------------|------------------|---------|-------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED-Fluorescente) |
| A | 17.99 | 10.28 | -7.71 |
| B | 18.63 | 11.55 | -7.08 |
| C | 18.75 | 9.97 | -8.78 |
| N | 98.09 | 80.97 | -17.12 |

En las Figuras 19 y 20 muestra gráficamente los promedios que resultaron para el THD_i , donde se puede observar la disminución de los niveles de distorsión armónica en corriente por el uso de las luminarias LED para el caso de cada línea y de la misma manera en el neutro.

De la figura 19 se puede observar una comparación de los promedios obtenidos con cada tecnología y una línea que indica el límite de 8% del código de red por lo que se puede observar una disminución significativa de la distorsión de corriente con el uso de las lámparas LED pero aún sin cumplir con el límite menor del 8%.

De la figura 20, se observa los promedios de las lámparas led y las lámparas fluorescentes y comparando con el límite del 8% en THDi establecido por el código de red. Se puede observar que los promedios de ambas tecnologías exceden el límite del 8%.

En la Figura 21 se observa el THDi de cada tecnología en un día, en horario de la mañana cuando las aulas tienen más actividades, se puede observar que los valores tienen un comportamiento constante, no hay variaciones bruscas para cada línea, pero los datos se encuentran por arriba de lo permitido por CFE (8% de acuerdo a código de red), se puede observar que las líneas A, B y C de las lámparas fluorescentes tienen valores más altos que las líneas A, B y C de las lámparas LED. Además, las curvas de tensión de las lámparas LED tienden a ser más constantes que las curvas de las líneas de las lámparas fluorescentes.

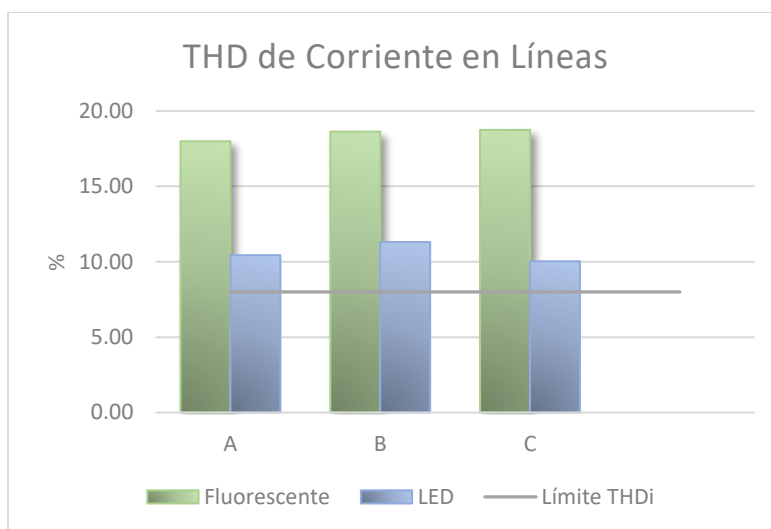


Figura 19. THD de corriente en líneas

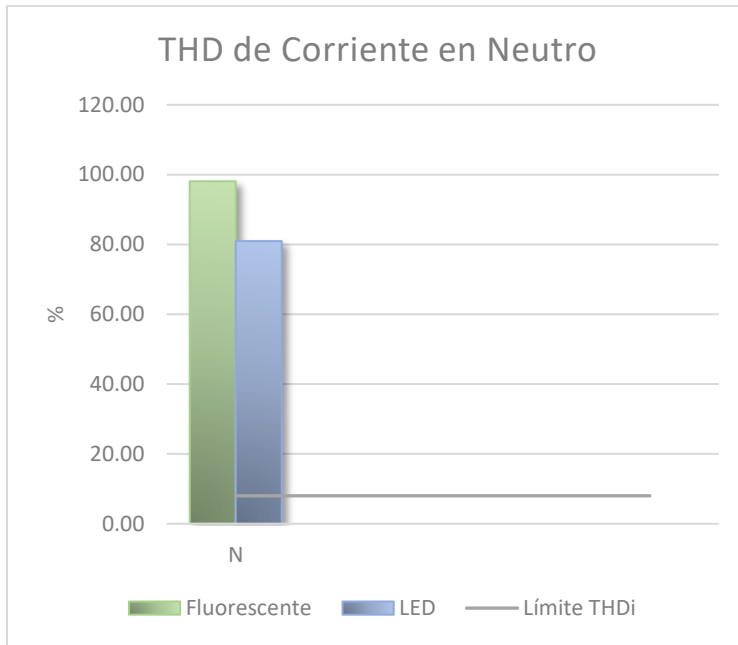


Figura 20. THD de corriente en el neutro

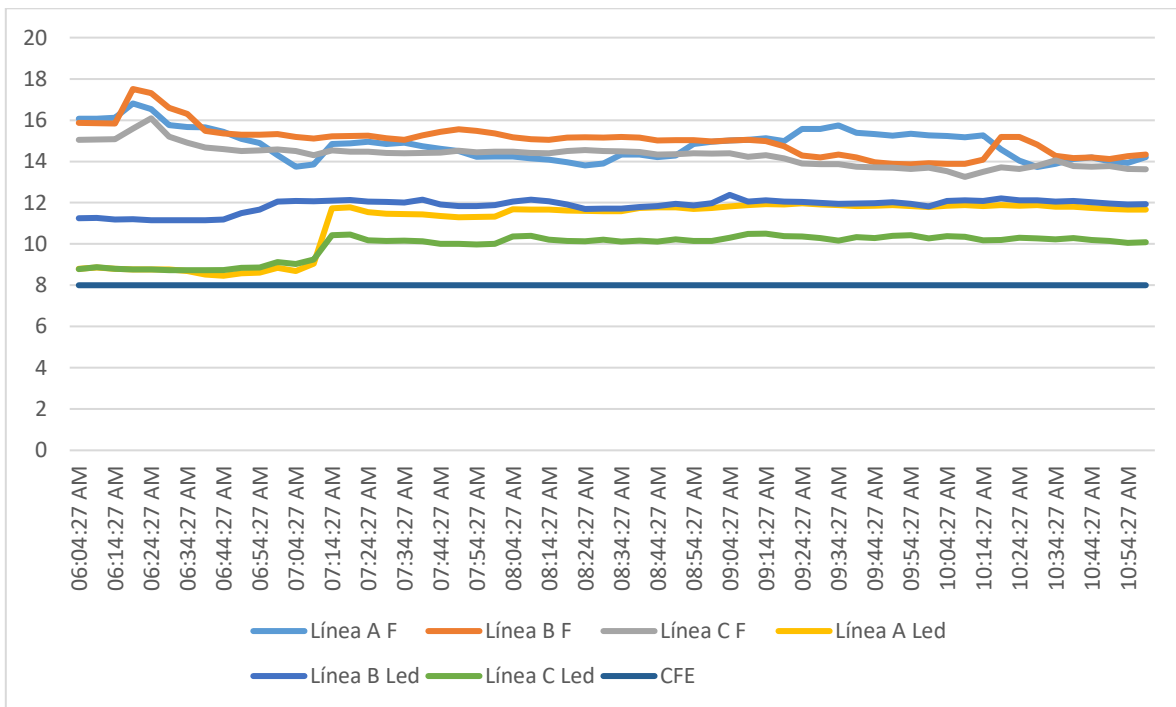


Figura 21. Variación de la Distorsión Armónica Total de corriente a lo largo del periodo de medición

4.3 Análisis de los componentes armónicos

4.3.1 Componentes Armónicas de tercer orden

4.3.1.1 Límites del componente armónico en tensión

Se presentan en este apartado los resultados de las armónicas de corriente y de tensión para cada tecnología de iluminación instalada en el edificio A y su análisis para cada componente armónica.

Para el análisis de los niveles totales de tensión en la tercera componente se tomó en cuenta la normativa CFE L0000-45 que establece los límites de distorsión para cada componente, definida con el 6% de acuerdo a la Tabla 6.

Como puede observarse, en los resultados que se presentan en la Tabla 11, el nivel de distorsión de la componente tercera disminuyó solo en la línea B y hubo un aumento de distorsión en la línea A de solo un 0.05%, en la línea C del 0.06. En el caso del neutro tuvo un incremento de distorsión con la lámpara LED del 1.19%, se puede observar que los niveles se encuentran a un nivel permitido para cada línea a excepción del neutro ya que, de acuerdo con CFE L0000-45 para la tercera componente debe haber como un máximo del 6% de distorsión (Tabla 6).

Tabla 11. Comparación de la Tercera Componente Armónica de Tensión, Fluorescente - LED

| Armónica de Tensión | | | |
|---------------------|------------------|---------|---------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED - Fluorescente) |
| AN | 0.39 | 0.44 | +0.05 |
| BN | 0.22 | 0.12 | -0.10 |
| CN | 0.13 | 0.19 | +0.06 |
| NG | 6.56 | 7.75 | +1.19 |

En las Figuras 22 y 23 se puede observar los promedios de la tercera componente armónica en tensión por el cambio de las luminarias fluorescentes a luminarias LED.

En la figura 23 se incluye los valores promedio de la 3era armónica, para la distorsión en tensión, para el neutro y se incluye el límite establecido por el código de red del 6%. Por lo que se observa fácilmente que en ambos tecnología exceden el límite del 6%, 6.56% para fluorescente y 7.75% para LED.

De la figura 24 se puede observar las gráficas para cada línea con los datos obtenidos para un día en la mañana, cuando hay más actividad en las aulas, se incluye la horizontal con el límite del 6% establecido por el código de red para los valores de la tensión. Por lo que se observar de los promedios obtenidos, se tiene unos valores muy por debajo del límite y unas curvas constantes con ambas tecnologías.

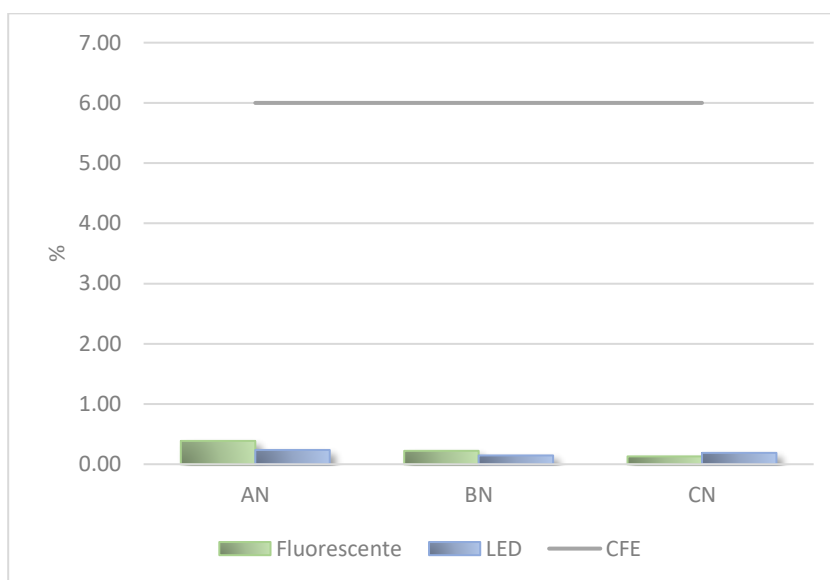


Figura 22. Componente de la 3era Armónica de tensión en líneas

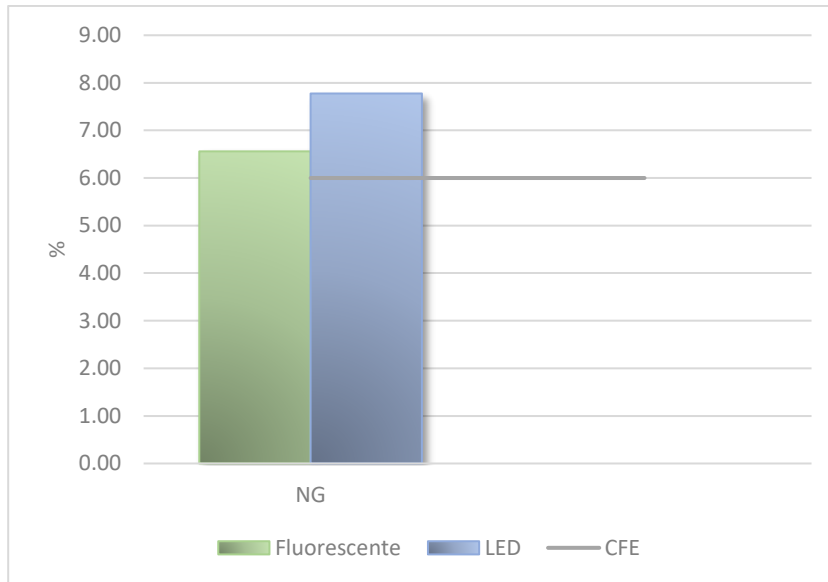


Figura 23. Componente 3 Armónica de Tensión en Neutro

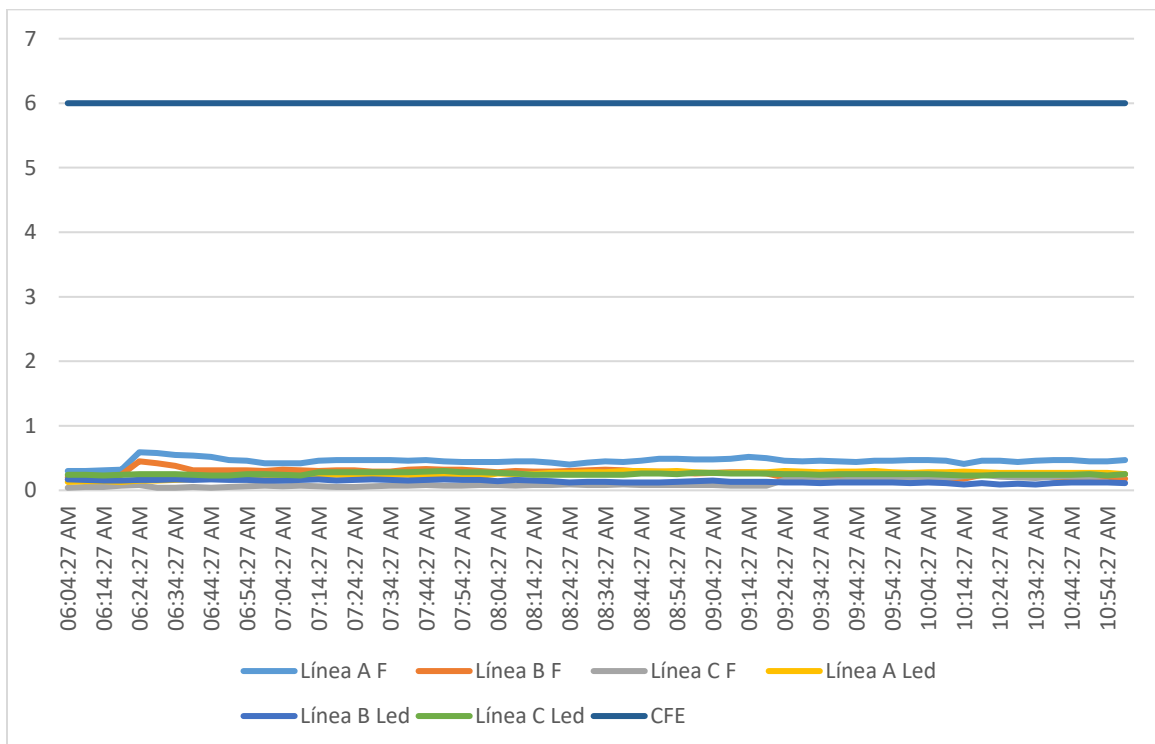


Figura 24. Límite de distorsión en tensión para cada línea en su tercera componente

4.3.1.2 Límites del componente armónico en corriente

Para el análisis de los niveles de distorsión en corriente se tomó en cuenta lo que establece la norma internacional IEC 61000-3-2 (Tabla 5) sobre los niveles permitidos de corrientes armónicas para tecnologías de iluminación. Al ser la única norma que se centra en equipos de iluminación es la adecuada para hacer el análisis con cada tecnología de iluminación. Para el correcto análisis se considera solo los límites en corrientes de línea ya que, como establece la norma, no se puede evaluar en neutro cuando el equipo es usado en trifásico. Para la corriente armónica en neutro se evaluó de acuerdo a lo establecido en la norma de CFE L0000-45 (Tabla 7).

De acuerdo a los resultados obtenidos de la Tabla 12, para cada línea en la tecnología fluorescente y la tecnología LED el límite de distorsión es de 2.3% (tabla 5), lo que no se cumple en ni uno de los casos, se puede observar que los niveles disminuyen aproximadamente un 8% con la tecnología LED. Para el neutro el límite de distorsión se encuentra en el 7%, de acuerdo con CFE L0000-45 (tabla 7), por lo que no se cumple en las lámparas fluorescentes ni en las lámparas LED, se puede observar una disminución en la distorsión por neutro de un 44.4% con tecnología LED.

Tomando en cuenta el límite establecido por CFE L0000-45 (tabla 7) para cada componente armónica menor a la onceava, se establece que el límite debe ser menor al 7% por lo que la información de la tabla 12 nos hace ver que no se cumple para la tecnología fluorescente, mientras que para la tecnología LED los datos obtenidos nos muestran unos valores dentro de los permitido.

Tabla 12. Comparación de la Tercera componente armónica de Corriente, Fluorescente - LED

| Armónica de Corriente | | | |
|-----------------------|------------------|---------|---------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED – Fluorescente) |
| A | 12.93 | 4.53 | -8.40 |
| B | 13.99 | 6.00 | -8.00 |
| C | 13.06 | 2.03 | -11.03 |
| N | 89.38 | 44.98 | -44.40 |

En la figura 25 se observa las gráficas de los promedios de las líneas para cada tecnología junto con el límite de 2.3% de la IEC 61000-3-2 y el límite de 7% del código de red. Se observa como los promedios de las lámparas fluorescentes no cumplen con ninguna norma mencionada. En el caso de las lámparas LED se observa que cumplen con el código de red, pero exceden el límite de la IEC 61000-3-2.

En la figura 26 se muestra los promedios obtenidos de la tercera componente armónica para el neutro, junto con las líneas de los límites establecidos por el código de red y la IEC 61000-3-2 por lo que es sencillo visualizar que hay un exceso en distorsión de la tercera componente armónica.

Se puede observar el comportamiento de distorsión en un corto periodo de tiempo en la Figura 27 donde se incluye el límite mencionado por CFE L0000-45 (con un 7%) y por IEC 61000-3-2 (con un 2.3%). Los datos son el resultado de cuando los equipos de iluminación trabajan más, puede observarse que, para cada línea de las lámparas fluorescentes tienen un comportamiento muy variado y que sobrepasan los límites de ambas normas mencionadas. Para las lámparas LED, el comportamiento de las curvas muestran ser más constantes y por debajo del límite establecido en el código de red.

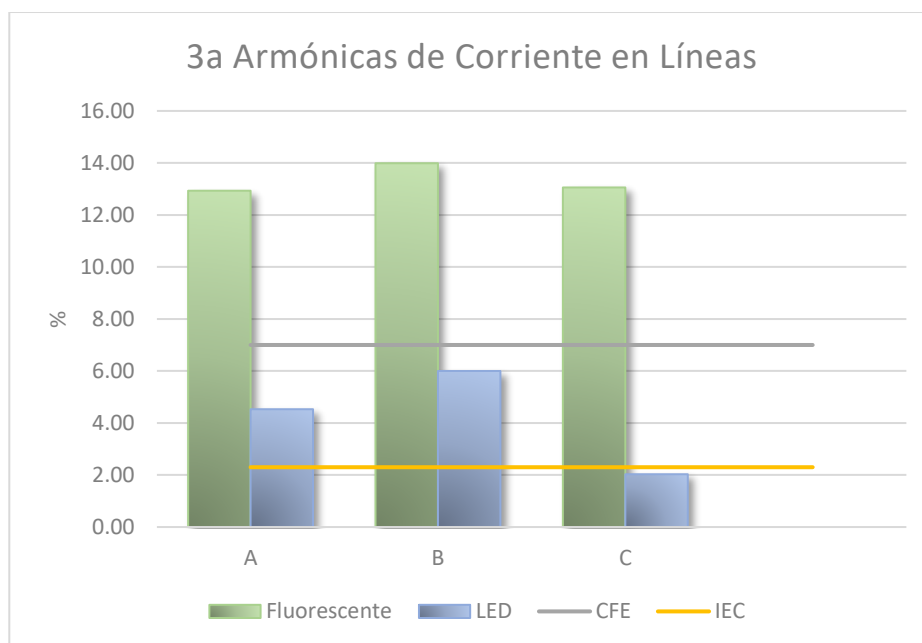


Figura 25. Tercera componente armónica de corriente en líneas

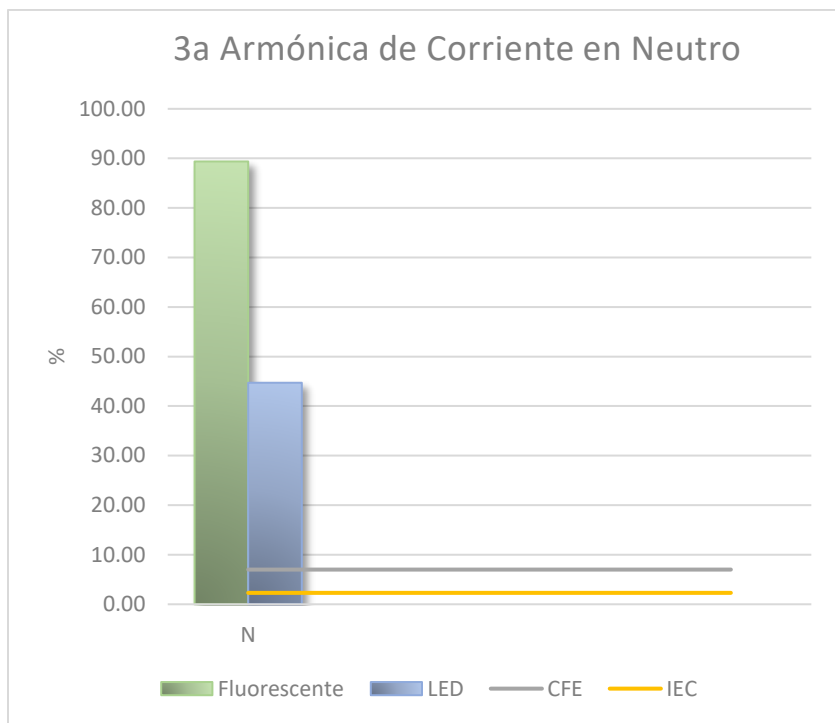


Figura 26. Tercera componente armónica de corriente en el neutro

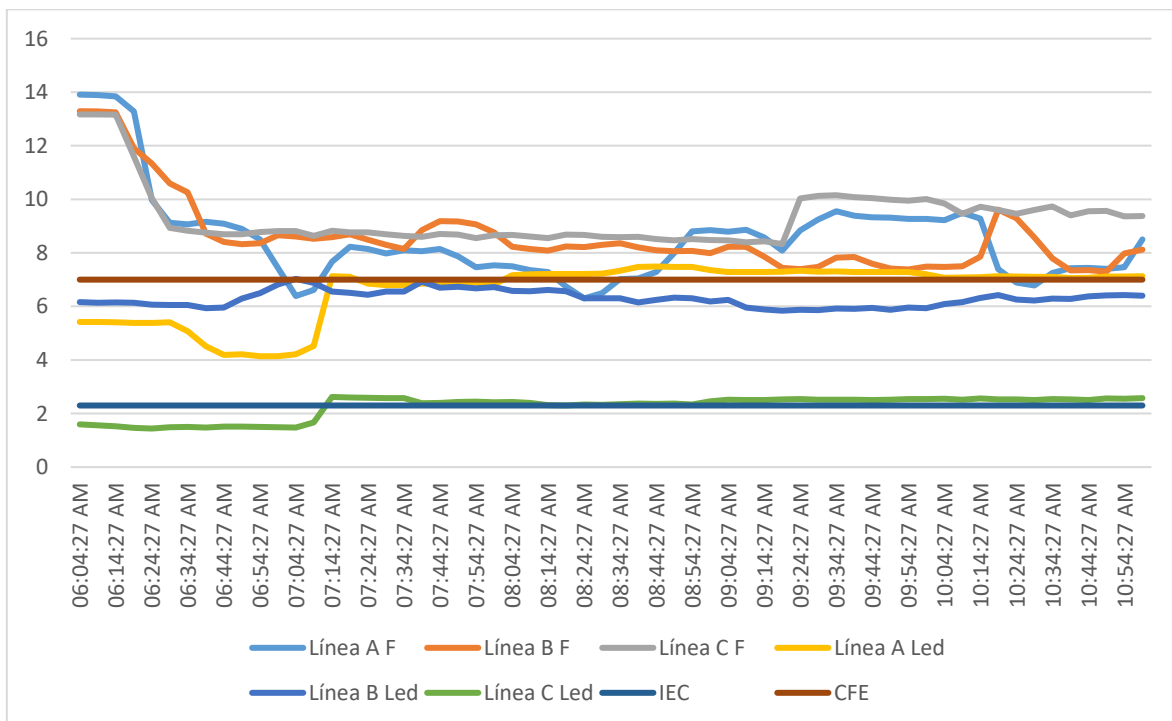


Figura 27. Límite de distorsión en corriente para cada línea en su tercera componente

4.3.2 Componentes armónicas de quinto orden

4.3.2.1 Límites de la componente en tensión

Como puede observarse de la Tabla 13 hubo un incremento, para cada una de las líneas, de la quinta componente armónica con el uso de la tecnología LED. De 0.77%, 1.03%, 0.95% para las líneas A, B, C, respectivamente y un incremento del 0.05% en el neutro. A pesar de los incrementos de distorsión, las líneas cumplen con lo establecido en la norma de CFE L0000-45 al no superar el 6% (Tabla 6) de distorsión por componente. Para el caso del neutro con las lámparas fluorescentes y las luminarias LED están cerca de exceder el 6% permitido por CFE L000-45.

Tabla 13. Comparación de la Quinta Componente Armónica de Tensión, Fluorescente - LED

| Armónica de Tensión | | | |
|---------------------|------------------|---------|---------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED – Fluorescente) |
| AN | 0.30 | 1.07 | +0.77 |
| BN | 0.21 | 1.24 | +1.03 |
| CN | 0.29 | 1.24 | +0.95 |
| NG | 5.82 | 5.77 | -0.05 |

En la figura 28 se observa los promedios de cada línea para las lámparas fluorescentes y las lámparas LED para compararlas con el límite establecido por el código de red del 6%. Es fácil visualizar que hubo un aumento de distorsión en la quinta componente para las lámparas LED y a pesar del incremento ambas tecnologías se encuentran por debajo de límite.

En la figura 29 se incluye los promedios de distorsión para ambas tecnologías, pero solo para el neutro y se comparan con el límite de 6% establecido por el código de red. En este caso hubo una disminución de distorsión en las lámparas LED comparado con las lámparas fluorescentes. Aun así, ambas tecnologías no exceden el límite mencionado.

En la Figura 30 puede observarse los datos obtenidos durante un horario matutino cuando los equipos de iluminación se encuentran en su mayor funcionamiento, al compararlos con el límite de 6% establecido por el código de red se puede visualizar

fácilmente que ambas tecnologías tienen valores de distorsión que están muy por debajo del límite, cabe señalar que las curvas tienden a ser constantes y sin presentar valores bajos o altos muy súbitos.

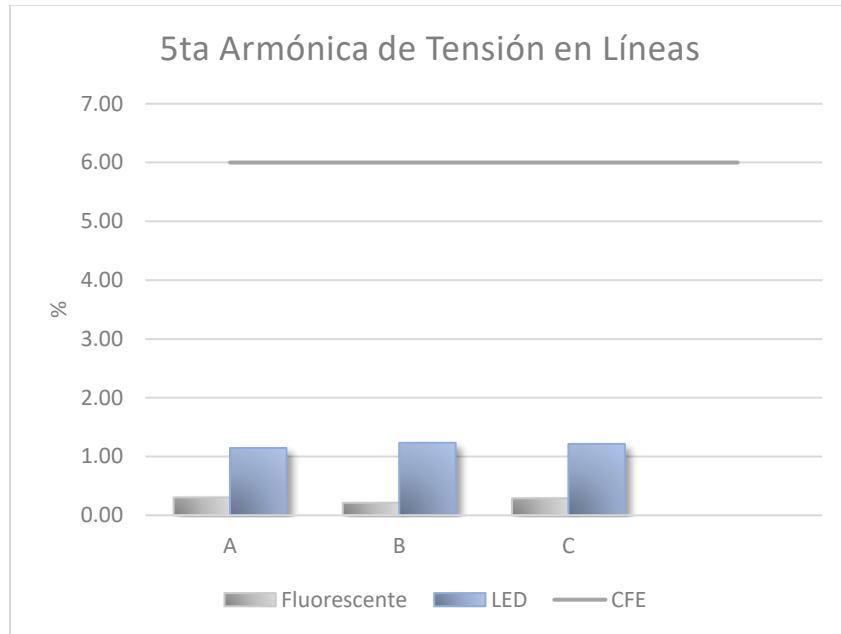


Figura 28. Componente armónica quinta de tensión en las fases

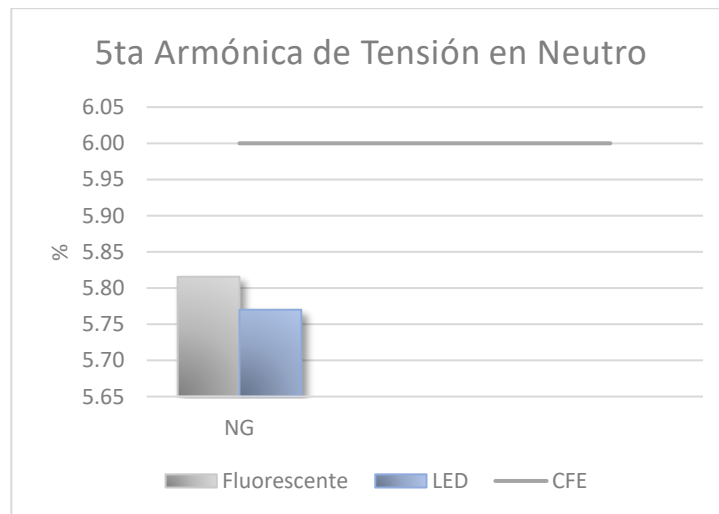


Figura 29. Componente armónica quinta de tensión en el neutro

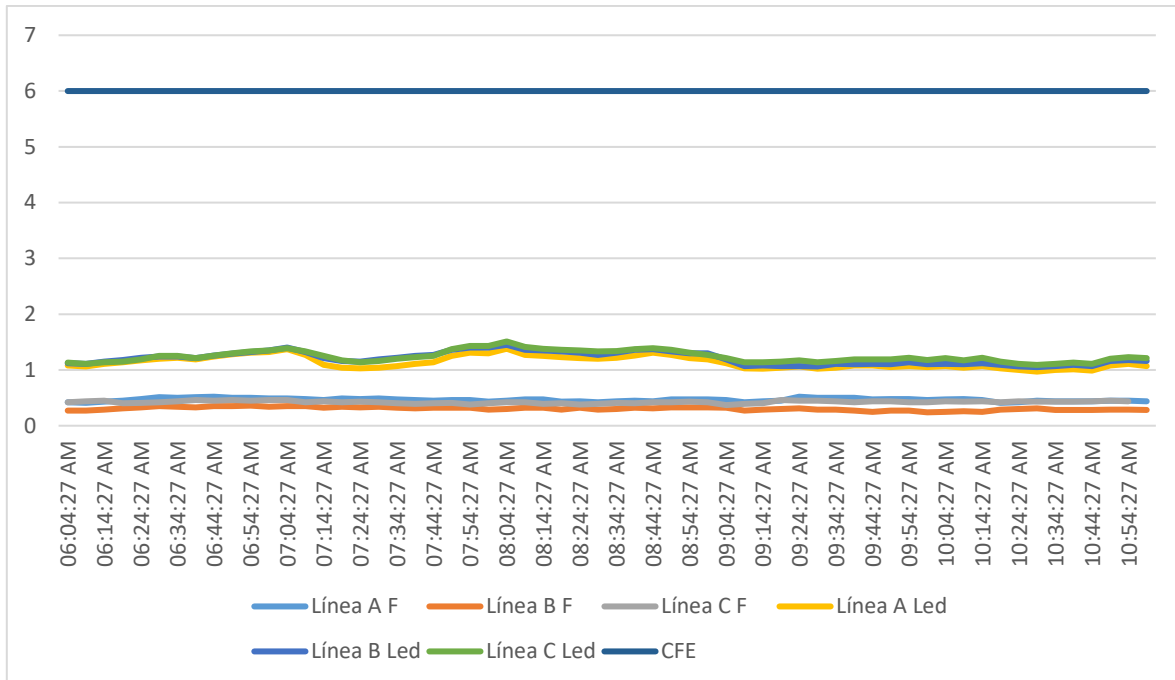


Figura 30. Límite de distorsión en tensión para cada línea en su quinta componente

4.3.2.2 Límites de la componente en corriente

Para los niveles de distorsión de corriente, se pueden observar los resultados en la Tabla 14. Donde hubo un incremento de distorsión para cada línea A y B del 0.05% y 0.66% respectivamente por otra parte, hubo una disminución del 0.45% de distorsión en la línea C con el uso de tecnología LED y una disminución de 2.02% de distorsión en el neutro, pero a pesar de esto ni una de las dos tecnologías cumplen con los límites permitidos por la IEC-61000-2-3 (tabla 5) que establece debe haber como máximo 1.14% de distorsión en la quinta componente. Y si se toma en cuenta los límites establecidos en el código de red para el caso de los valores en el neutro sobrepasan el límite de 4% de distorsión en componente.

Si comparamos los resultados de la Tabla 14 como lo establecido por CFE L0000-45 (tabla 7) se puede observar que está dentro de lo permitido al no exceder el 7% de distorsión en corriente, así mismo se hace la comparación grafica en la Figura 31 donde se incluye los límites establecidos por cada normativa.

Tabla 14. Comparación de la Quinta componente armónica de corriente, Fluorescente - Led

| Armónica de Corriente | | | |
|-----------------------|------------------|---------|--------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (Led – Fluor) |
| A | 2.68 | 2.98 | +0.05 |
| B | 2.80 | 3.46 | +0.66 |
| C | 2.58 | 2.13 | -0.45 |
| N | 6.58 | 4.56 | -2.02 |

En la figura 31 se muestra gráficamente los promedios de distorsión para cada tecnología y se incluye el límite de 7% establecido por el código de red al igual que el límite establecido por la IEC 61000-3-2 de 1.14%. Se observa que ambas tecnologías no exceden el límite de 7% y se encuentran muy por debajo del 3% pero con el límite de la IEC cada línea y el neutro exceden un poco el 3%.

De la figura 32 se puede observar el comportamiento de distorsión en un corto periodo de tiempo donde se incluye el límite mencionado por CFE L0000-45 (del 7%) y por IEC 61000-3-2 (del 1.14%). Los datos son el resultado de cuando los equipos de iluminación trabajan más, se observa que los datos para cada línea presentan un comportamiento constante con el uso de las lámparas fluorescentes y con las lámparas LED hay más variaciones en los valores de distorsión.

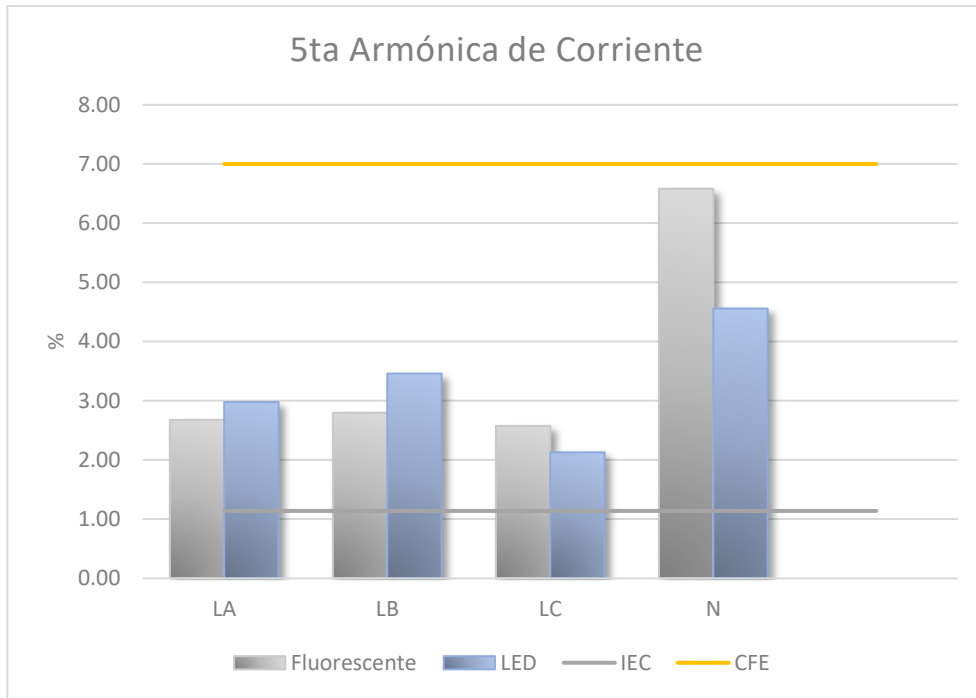


Figura 31. Quinta componente armónica de corriente

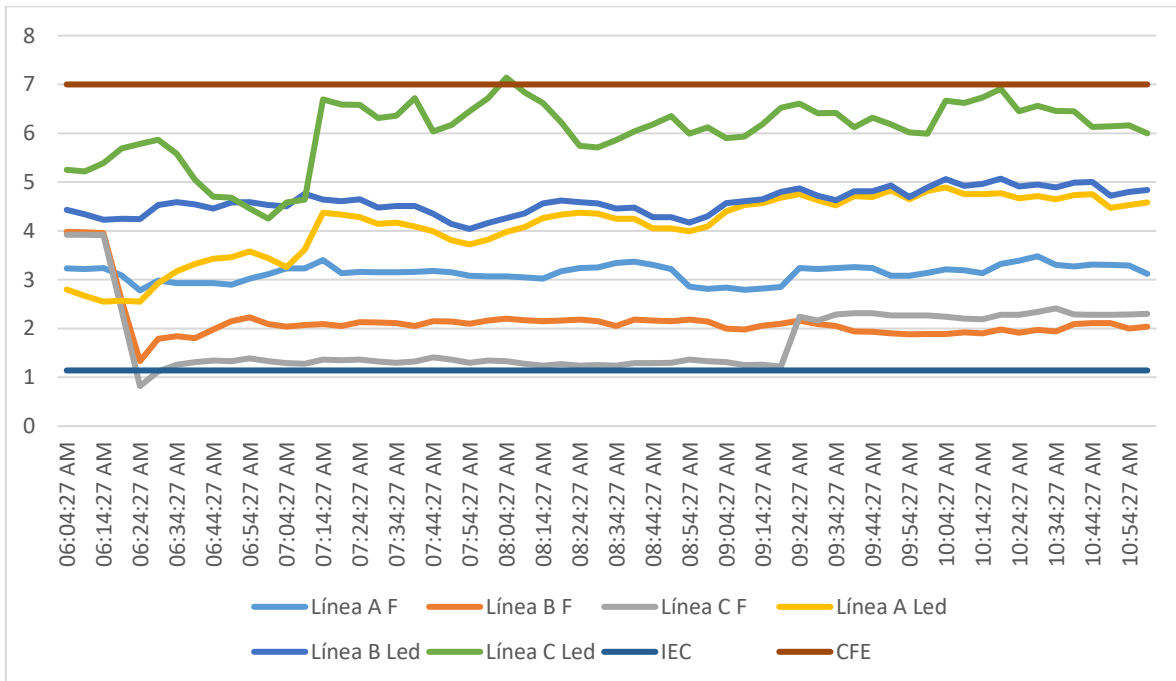


Figura 32. Límite de distorsión en corriente para cada línea en su quinta componente

4.3.3 Componentes armónicas de séptimo orden

4.3.3.1 Límites del componente armónico en tensión

De la Tabla 15 se puede observar que hubo un incremento de distorsión en la línea A con un 0.03, mientras que en las líneas B y C se mantuvo cerca de los mismos valores. A pesar de estos incrementos si se toma en cuenta que la especificación CFE L0000-45 que permite hasta un 6% (Tabla 6) de distorsión en tensión por componente, se está cumpliendo con lo establecido por la norma. En el caso del neutro se puede observar que se encuentra dentro del límite y hay una disminución en distorsión del 0.35% con la tecnología LED.

Tabla 15. Comparación de la Séptima componente Armónica de tensión, Fluorescente - LED

| Armónica de Tensión | | | |
|---------------------|------------------|---------|---------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED – Fluorescente) |
| AN | 0.28 | 0.31 | +0.03 |
| BN | 0.29 | 0.29 | 0.00 |
| CN | 0.31 | 0.32 | +0.01 |
| NG | 6.02 | 5.67 | -0.35 |

En la figura 33 se ha incluido los valores promedio de distorsión para la 7ma armónica para cada una de las tecnologías de iluminación eh incluyendo el límite de distorsión establecido por el código de red de 6%. Puede observarse que en ambas tecnologías la distorsión armónica esta muy por debajo del límite.

En la figura 34 se ha graficado los niveles promedio de distorsión armónica obtenidos del neutro para cada tecnología y se compara con el límite establecido por el código de red (de 6%). Para la tecnología LED se observa un mayor contenido de distorsión armónica que con la tecnología fluorescente, pero ambas se encuentran por debajo del límite.

En la figura 35 se ha incluido los datos de distorsión armónica de la séptima componente para cada tecnología y se incluye el límite del 6% de distorsión mencionado por el código de red por lo que es fácil visualizar que para ambas tecnologías los niveles de

distorsión armónica están muy por debajo del límite y con valores de distorsión que son constantes los que indica un buen funcionamiento de las lámparas y el sistema de iluminación.

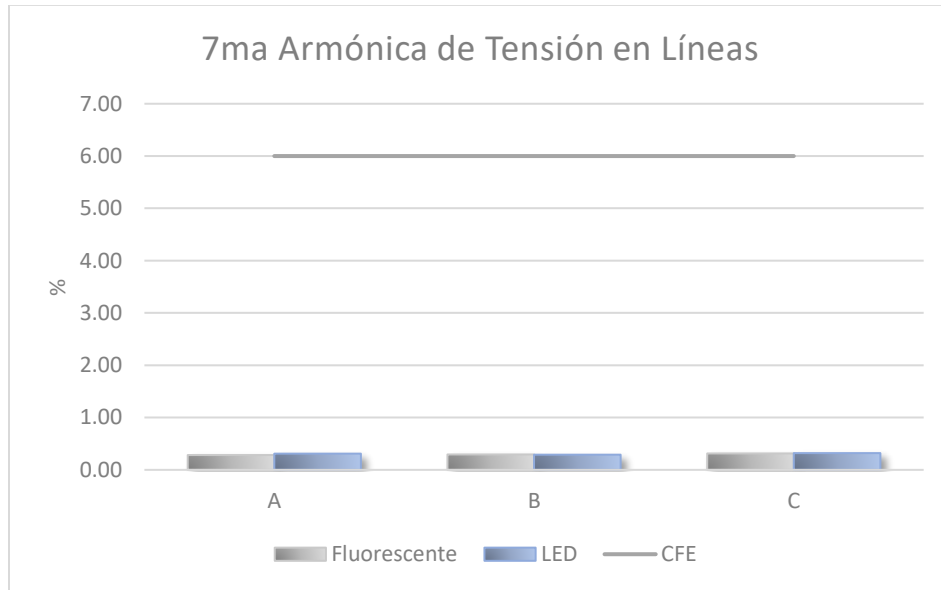


Figura 33. Séptima componente Armónica de tensión

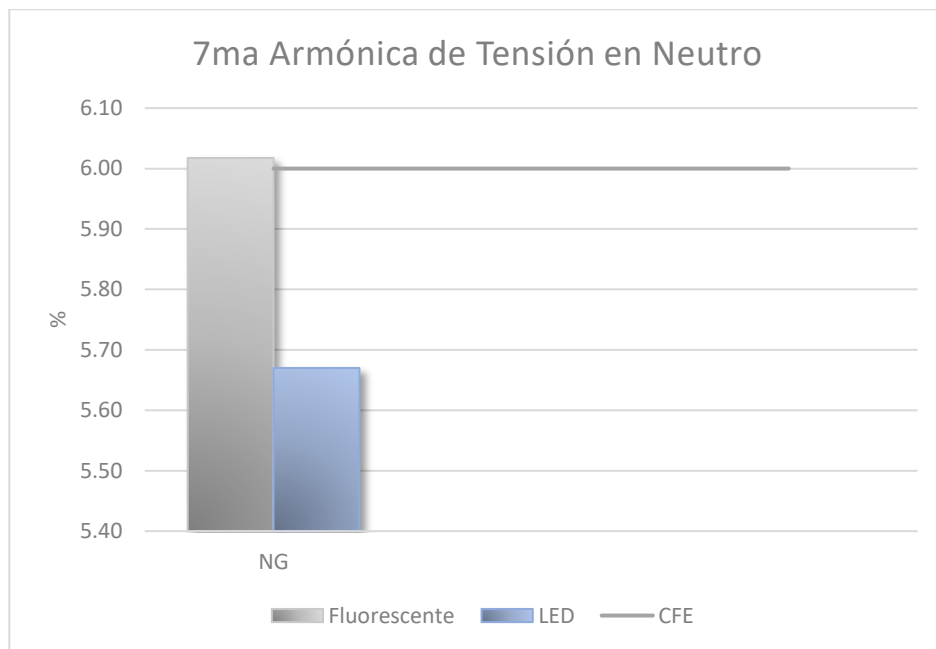


Figura 34. Séptima componente armónica de tensión en el neutro

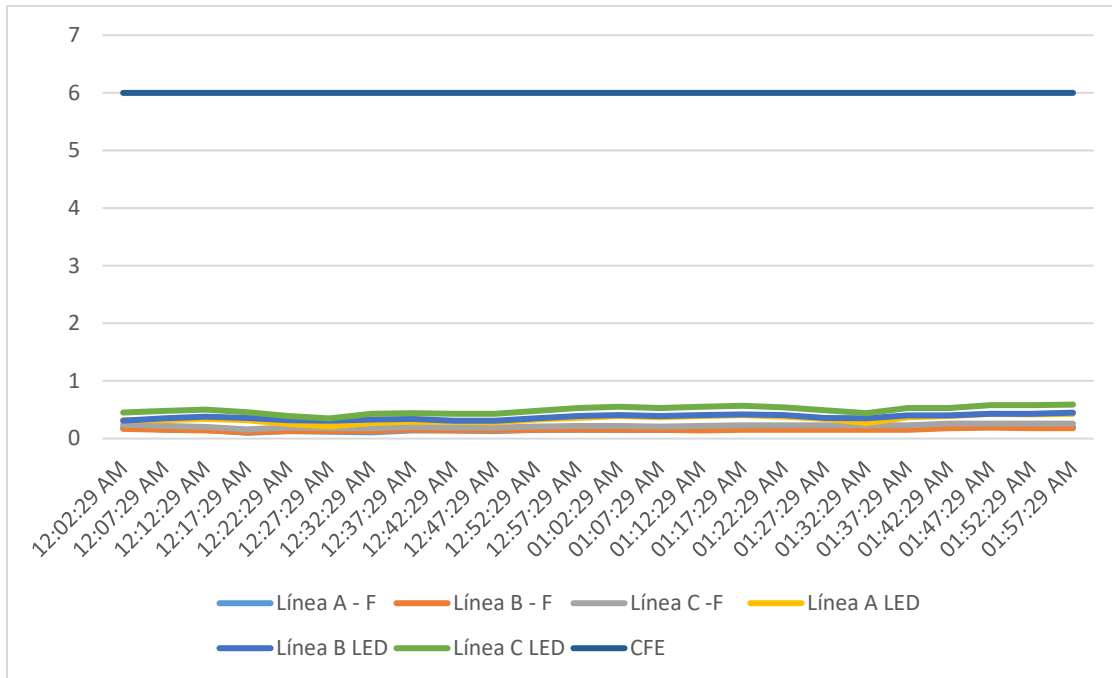


Figura 35. Límite de nivel armónico en tensión para cada línea para la séptima componente

4.3.3.2 Límites de la componente en corriente

De la Tabla 16 observamos que para cada una de las líneas y el neutro hubo un incremento en los niveles de distorsión donde el valor más alto es en la línea C, con un incremento del 1.73%. Para el neutro hubo una disminución del 0.25% de distorsión con el uso de la tecnología LED. Tanto la tecnología fluorescente como LED no cumplen con lo establecido en la norma internacional IEC-61000-2-3 (Tabla 5), que permite hasta un 0.77% de distorsión armónica para la séptima componente.

Tomando en cuenta lo establecido por el código de red CFE L0000-45 (Tabla 7) donde se menciona que no debe haber un excedente el 7% para componentes armónicas menores a la onceava podemos observar que se cumple para cada línea (Figura 36).

Tabla 16. Comparación de la Séptima componente armónica de corriente, Fluorescente - LED

| Armónica de Corriente | | | |
|-----------------------|------------------|---------|---------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED – Fluorescente) |
| A | 3.06 | 3.30 | +0.24 |
| B | 3.36 | 3.87 | +0.51 |
| C | 2.16 | 3.89 | +1.73 |
| N | 4.62 | 4.37 | -0.25 |

De la Figura 36 se muestra los promedios mencionados en la tabla 16 de forma tabular para cada tecnología, también se incluyen los límites de distorsión armónica para la séptima componente que es del 7% establecido en el código de red y de 0.77% por la IEC-61000-2-3 por lo que es fácil observar que hay una mayor cantidad de distorsión de corriente con el uso de la tecnología LED para cada línea. Y que la tecnología fluorescente y LED no cumplen con el límite establecido por la IEC-61000-2-3 pero si están muy por debajo del límite mencionado por el código de red.

En la Figura 37, se ha incluido los datos de distorsión armónica para cada una de las tecnologías y se incluye los límites de distorsión establecidos por CFE L0000-45 (7%) y por IEC 61000-3-2 (0.77%). Se observa que los datos de distorsión para ambas tecnologías presentan un comportamiento constante y que los niveles de distorsión se encuentran por arriba del límite permitido por IEC 61000-3-2 pero por debajo de lo permitido por CFE L0000-45.

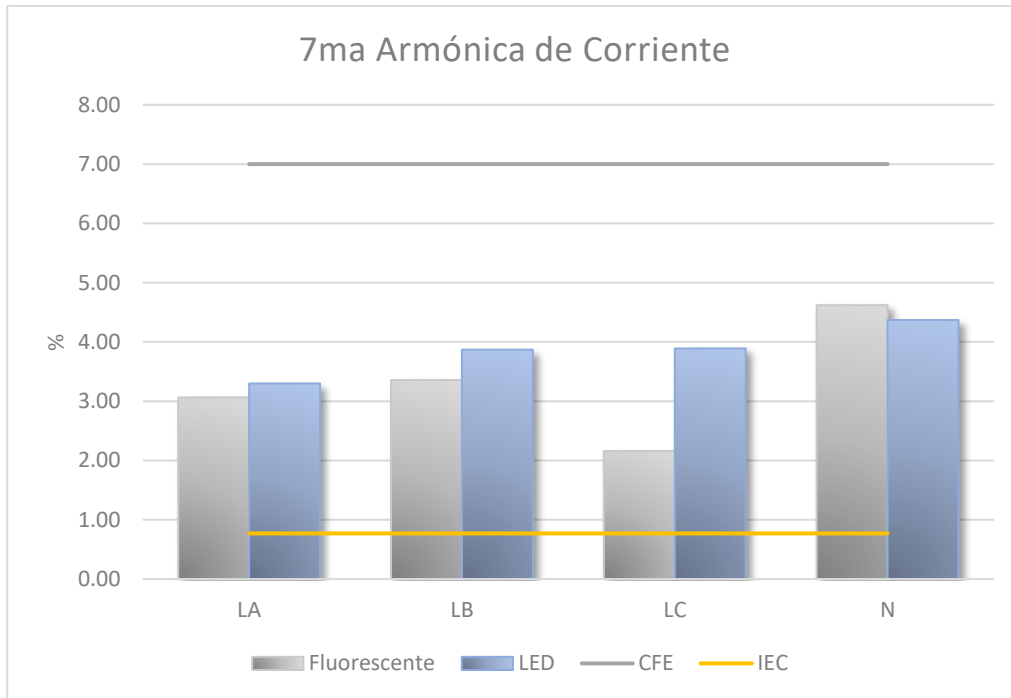


Figura 36. Séptima componente armónica de corriente

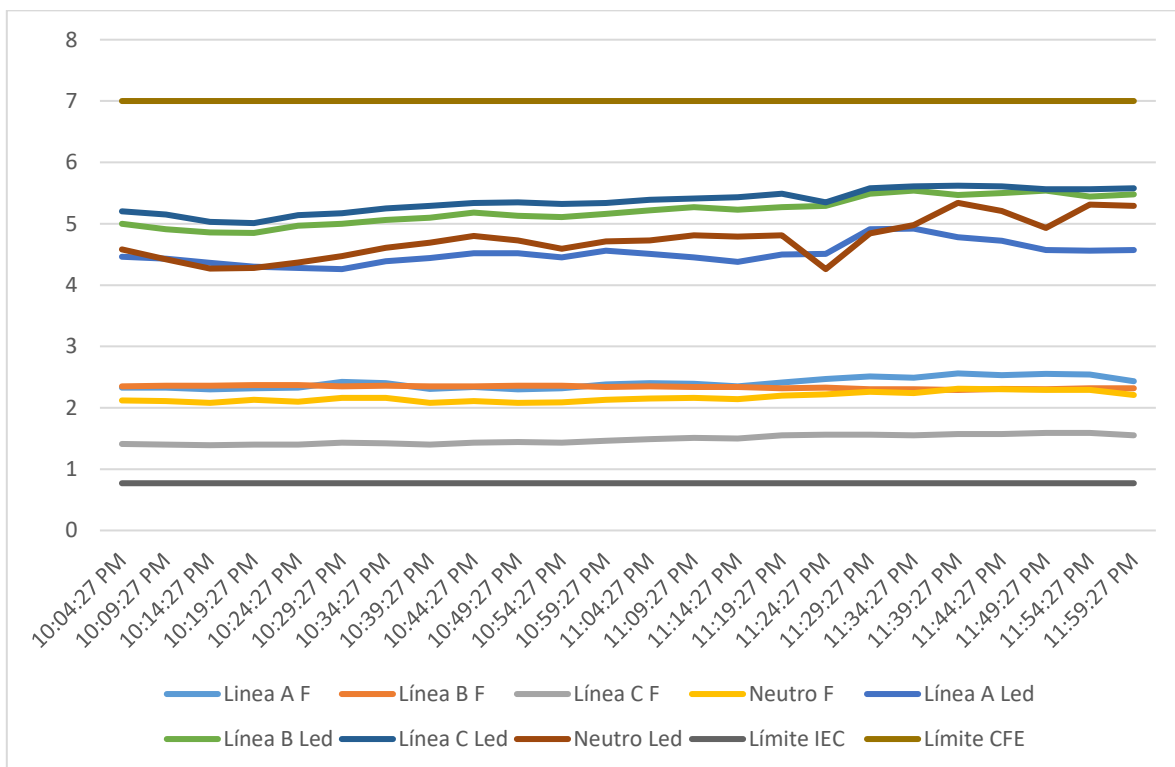


Figura 37. Variación de la séptima armónica en corriente y el límite permitido

4.3.4 Componentes armónicas de onceavo orden

4.3.4.1 Límites de la componente en tensión

De la Tabla 17 se puede observar que hubo una disminución de distorsión para cada una de las líneas e incluyendo el neutro, con disminuciones muy pequeñas cada una de las líneas están dentro del valor permitido por el código de red CFE L0000-45 (Tabla 6) de no exceder el 6% para una componente onceava. Para el caso del neutro a pesar de que hubo una disminución de 1.81% de distorsión, la tecnología fluorescente como la LED no cumplen con el límite permitido del 6% (Tabla 6) de distorsión en tensión. En el caso de las líneas hubo una disminución de la distorsión de un 0.3% con el uso de la tecnología LED.

Tabla 17. Comparación de la Onceava armónica de tensión, Fluorescente - LED

| Armónica de Tensión | | | |
|---------------------|------------------|---------|------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia |
| AN | 0.48 | 0.18 | 0.3 |
| BN | 0.45 | 0.15 | 0.3 |
| CN | 0.46 | 0.16 | 0.3 |
| NG | 7.93 | 6.12 | 1.81 |

En las Figura 38 se ha incluido los promedios de distorsión para la onceava componente de cada línea y se incluye el límite del 6% establecido por el código de red, por lo que es sencillo visualizar que para las lámparas fluorescentes y las lámparas LED los niveles de distorsión están muy por debajo del límite permitido.

En la figura 39 se ha incluido gráficamente los promedios del nivel de distorsión armónica para la onceava componente para el neutro, junto con el límite de 6%, establecido por el código de red y se puede observar que para las lámparas fluorescentes la distorsión armónica se encuentra muy por arriba del límite del 6%, mientras que la cantidad de distorsión en las lámparas LED están justo en el límite.

De la Figura 40 se muestra los límites de distorsión armónica para la onceava componente establecido por el código de red del 6% se puede observar que el comportamiento de distorsión durante el horario matutino, cuando las aulas tienen más

actividades, los datos muestran un comportamiento constante y para cada tecnología los niveles de distorsión están muy por debajo del límite.

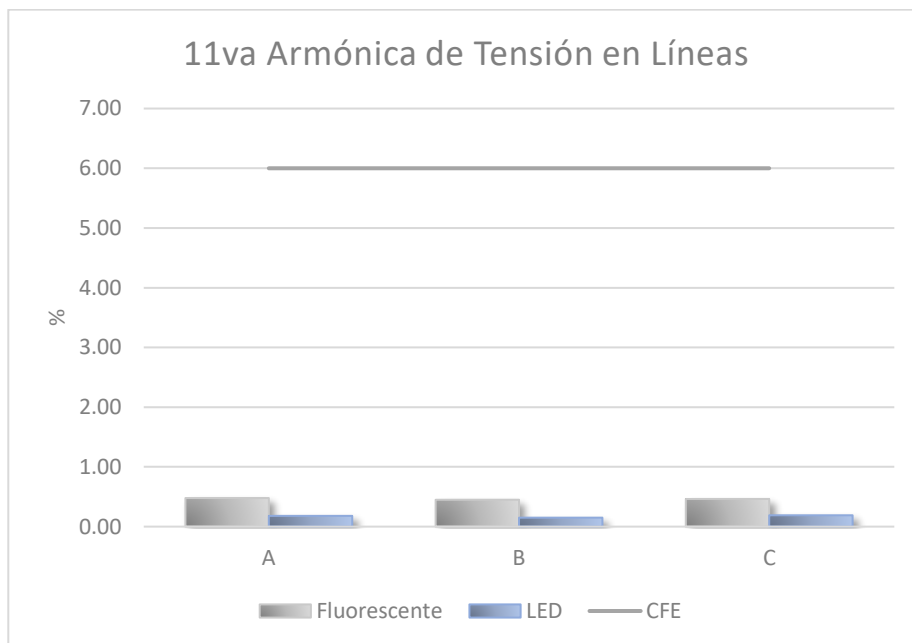


Figura 38. Onceava armónica de tensión

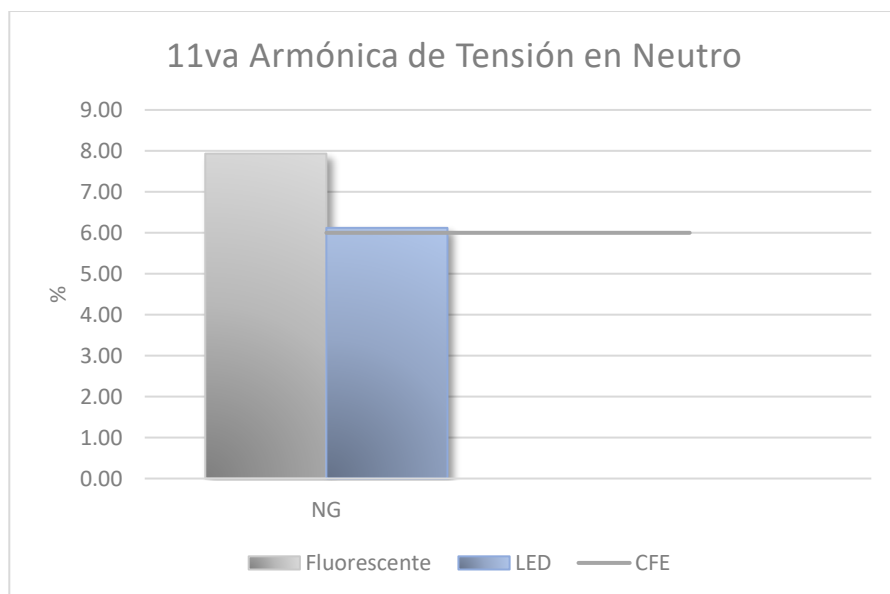


Figura 39. Onceava armónica de tensión en el neutro

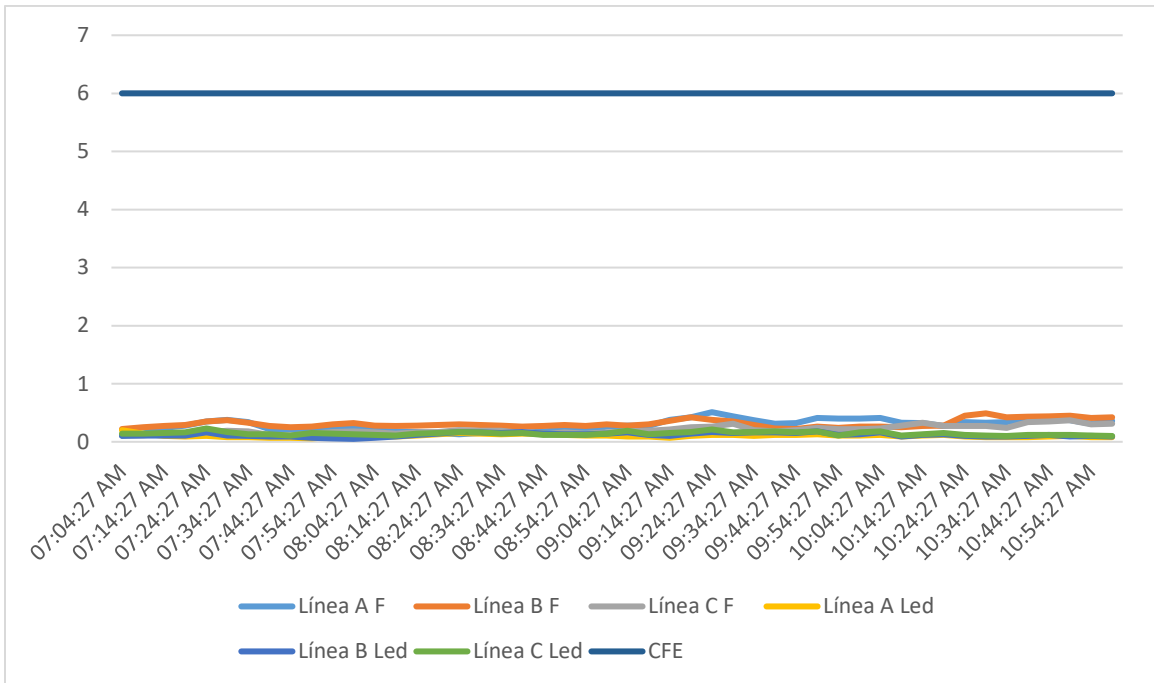


Figura 40. Variación de la onceava armónica en tensión y el límite permitido

4.2.4.2. Límites de la componente en corriente

De la Tabla 18 se detallan los resultados de distorsión en corriente. En este caso los niveles disminuyeron para cada una de las líneas y para el neutro con el uso de las lámparas LED. Considerando lo establecido en la norma internacional IEC 61000 (Tabla 5), ni una de las tecnologías cumple con el límite máximo de 0.33% para la onceava componente. Y tomando en cuenta lo establecido en el código de red CFE L0000-45 (Tabla 7) podemos observar la tecnología LED cumplen al no exceder el 3.5% de distorsión (Tabla 18), para la tecnología fluorescente se excede el límite en las tres líneas. En el neutro hay una disminución de distorsión del 1.4% pero no cumplen con lo establecido en el código de red. En el caso de las tres líneas hubo una disminución de distorsión del 3.07% para la A, 2.91% para la B y 1.98% para la C. En la Figura 39 se puede observar el comportamiento en un periodo de tiempo de cada tecnología con los límites establecidos por CFE L0000-45 y la IEC 61000.

Tabla 18. Comparación de la Onceava armónica de corriente, Fluorescente - LED

| Armónica de Corriente | | | |
|-----------------------|------------------|---------|---------------------------------|
| Línea | Fluorescente (%) | LED (%) | Diferencia (LED – Fluorescente) |
| A | 4.87 | 1.8 | 3.07 |
| B | 5.41 | 2.5 | 2.91 |
| C | 4.24 | 2.26 | 1.98 |
| N | 5.68 | 4.28 | 1.4 |

De la Figura 41 se muestra los promedios de distorsión armónica mencionados en la tabla 18 de forma tabular para cada tecnología junto con el límite de distorsión armónica establecido por la IEC 61000-3-2 (del 0.33%) y el límite del código de red (del 3.55%). Se observa que hay una mayor cantidad de distorsión de corriente en la tecnología fluorescente para cada línea comparado con la tecnología LED. Además, tanto la tecnología fluorescente y LED no cumplen con el límite de la IEC 61000-3-2 y solo la tecnología LED tiene niveles de distorsión armónica menores al límite establecido por el código de red.

En la Figura 42 se incluyen los datos de distorsión armónica obtenidos en un horario matutino, cuando los equipos de iluminación se encuentran trabajando, y se incluyen los límites establecidos por CFE L0000-45 (del 3.55%) y por IEC 61000-3-2 (del 0.33%). Se observa que los datos para cada línea presentan un comportamiento constante en el caso de las lámparas LED para las líneas de las lámparas fluorescentes tienden a variar mucho con la distorsión armónica por lo que se puede observar un aumento de distorsión armónica a partir de las siete de la mañana. Para concluir, con la distorsión armónica de la onceava componente, ambas tecnologías se encuentran por arriba del límite permitido por IEC 61000-3-2 y por debajo del límite establecido por CFE L0000-45.

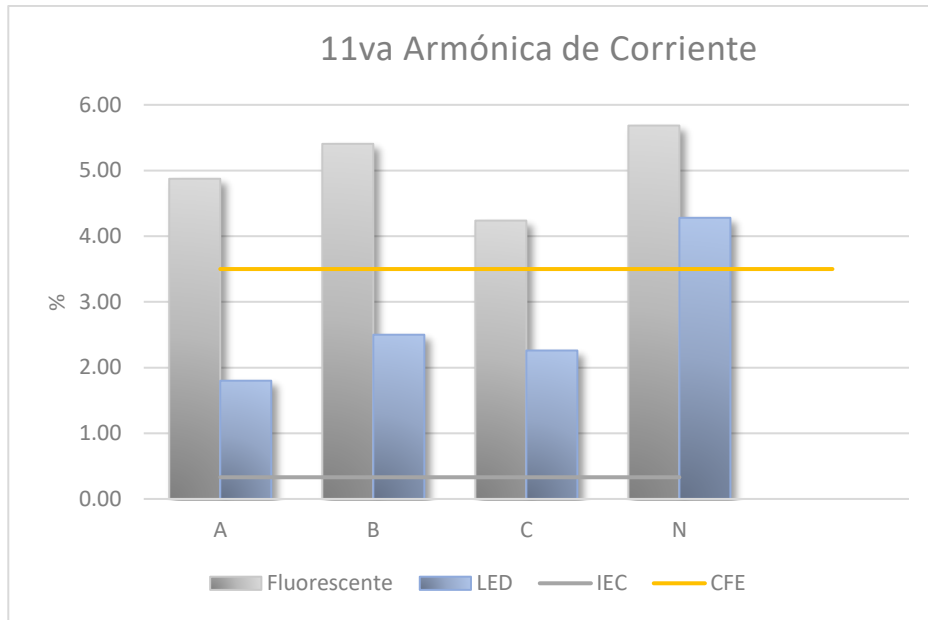


Figura 41. Onceava armónica de corriente

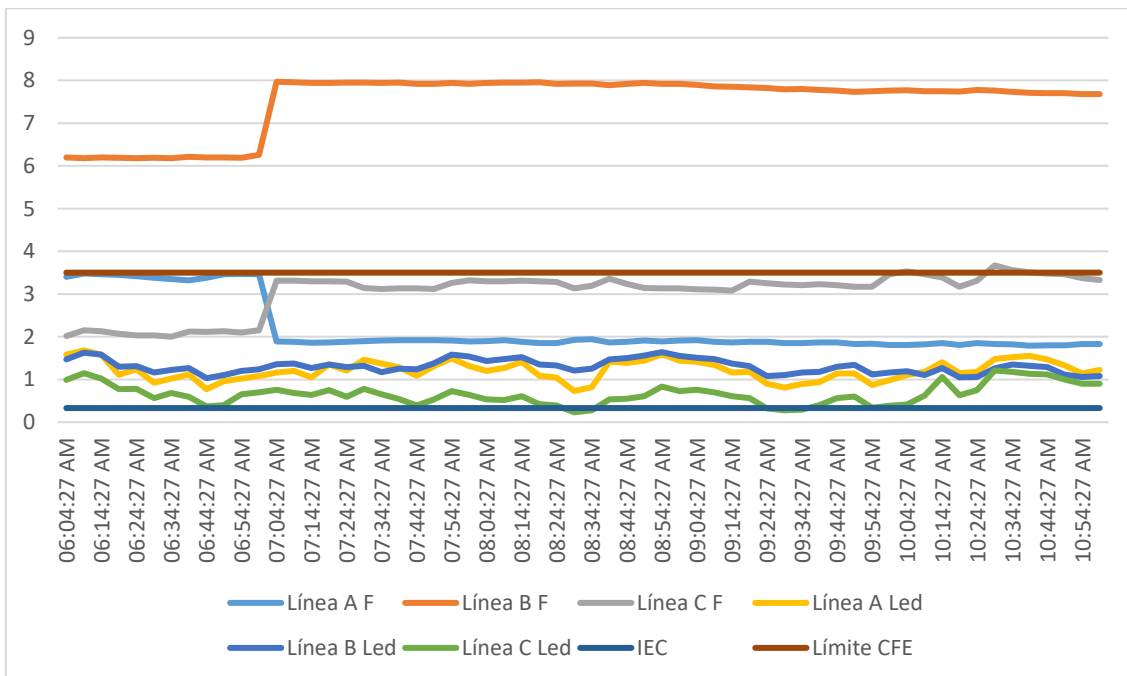


Figura 42. Variación de la onceava armónica en corriente y el límite permitido

4.4 Factor de Potencia

En esta sección se desarrolla el análisis del factor de potencia del sistema de iluminación del edificio A en el Plantel San Lorenzo Tezonco.

El factor de potencia (FP) es el nombre dado a la relación de la potencia activa o utilizable que es medida en kilowatts (kW) y la potencia aparente se mide en kilo volts amperes (kVA). Idealmente, el factor de potencia debe ser lo más cercano a la unidad como sea posible (Pinto León).

La importancia de tener un alto factor de potencia en un sistema es equivale a tener un buen aprovechamiento de la energía que se suministra, si nuestros equipos llegan a demandar más potencia reactiva esto implicaría una carga adicional a los generadores, a las líneas de transmisión, los transformadores, a cables e interruptores, razón por la cual tener un bajo factor de potencia es penalizado por el suministrador (CFE para el caso de México) por lo que es un beneficio tener un alto factor de potencia al evitar costos altos por el consumo de energía.

En México, es obligatorio para sistemas de media tensión (demanda contratada mayor a 1 MW) y alta tensión tener un factor de potencia mínimo de 0.95 y que debe mantenerse por al menos el 95% del tiempo durante un mes.

De la Figura 43 se puede observar, el histograma del factor de potencia del sistema de iluminación con lámparas LED, donde se muestra que el promedio del FP es de 0.89, donde llega haber valores máximos de 0.9 y valores mínimos de 0.76, los últimos datos pueden deberse a que hay una carga diferente conectada al sistema y al momento de apagar las luminarias la carga restante genera un factor de potencia bajo. De los resultados de puede observar que las luminarias LED cumplen con lo establecido en su ficha técnica (Tubos LED Essential T8 Mains, 2024, Anexo B) al tener un factor de potencia igual al 0.9.

En el caso de las lámparas fluorescentes, Figura 44, el promedio obtenido es de 0.95 con valores máximos de 0.98 y mínimos de 0.05. Donde su ficha técnica (Anexo A indica un factor de potencia superior a 0.95).

En la Figura 45 se observa el comportamiento del factor de potencia durante un día para las luminarias fluorescentes y las luminarias LED se puede observar que el comportamiento es constante para ambas tecnologías y el factor de potencia tiende a ser menor comparado con las luminarias LED. Puede observarse que para ambas tecnologías hay una disminución del FP en horarios de baja actividad del edificio.

En resumen, el factor de potencia con el uso de la tecnología LED se ve disminuido al compararlo con la tecnología fluorescente, por lo que sería interesante llevar a cabo un análisis más detallado de lo que pueda estar afectando la disminución del FP, para alcances de este estudio podemos inferir que el problema se deriva de la gran cantidad de luminarias que hay en el sistema.

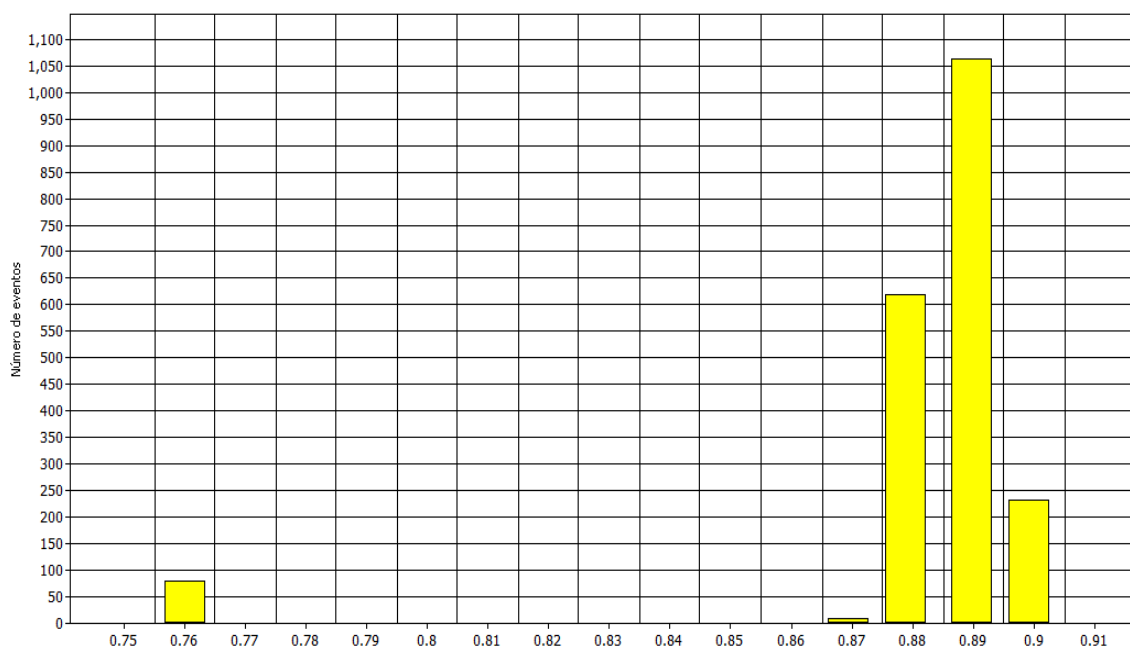


Figura 43. Factor de potencia del sistema con lámparas LED

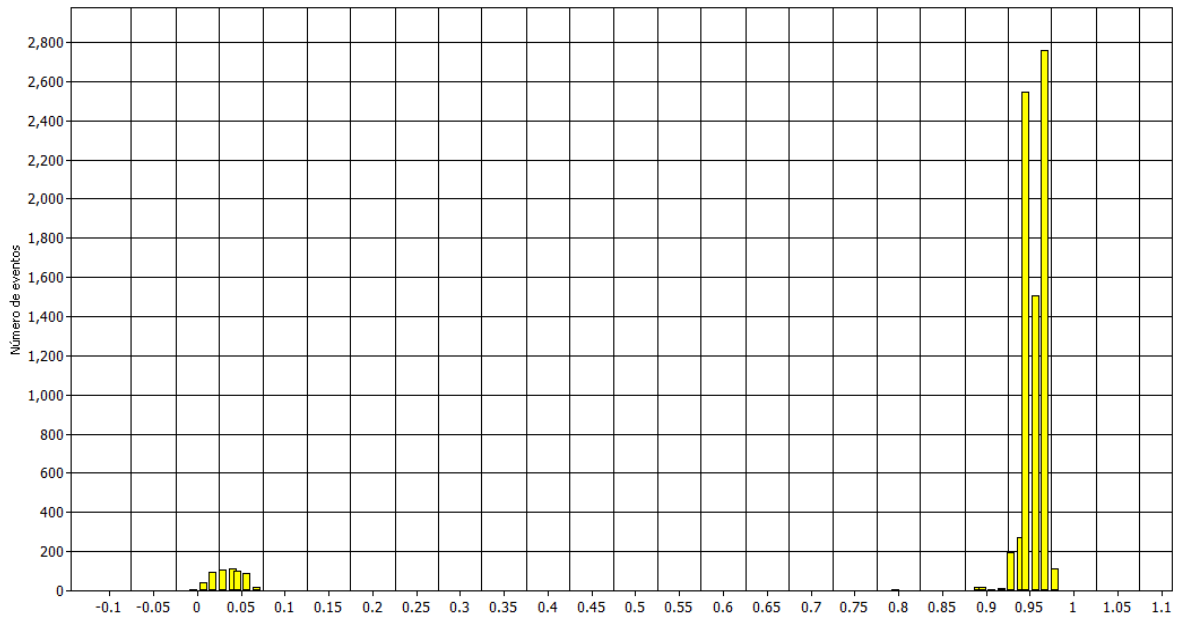


Figura 44. Factor de potencia del sistema con lámparas fluorescentes

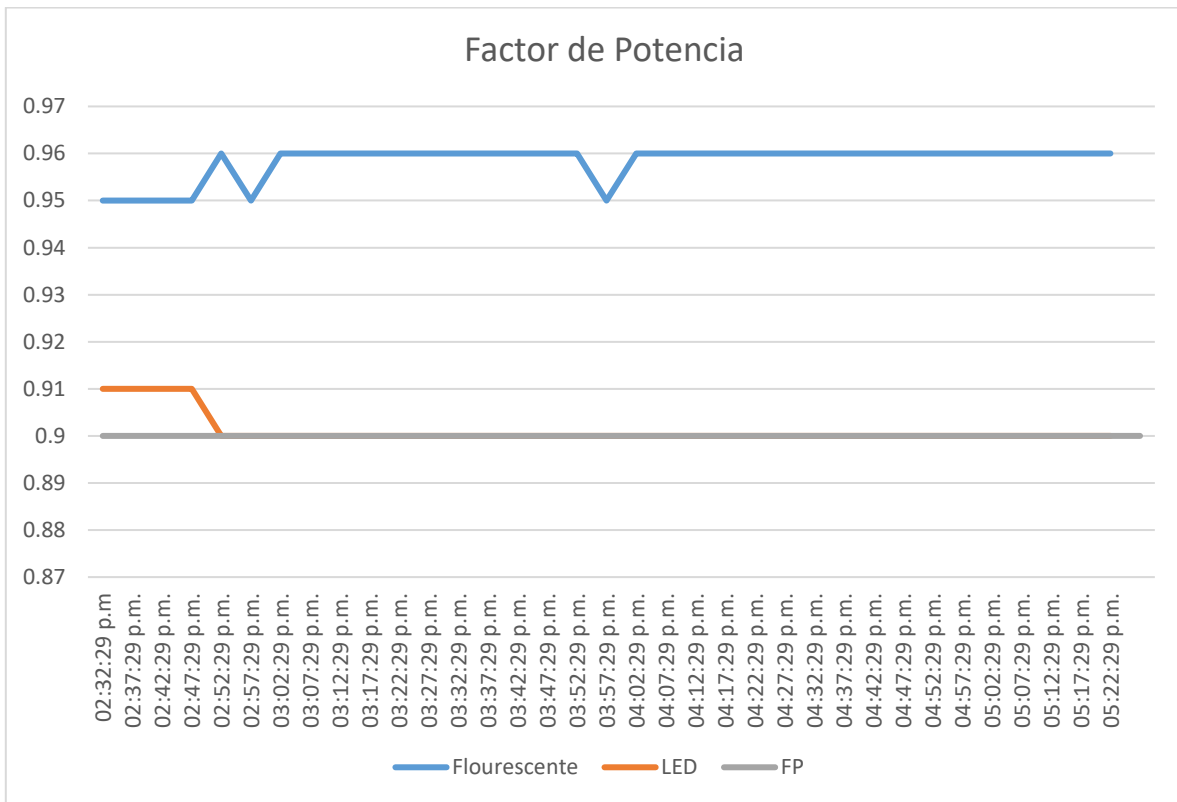


Figura 45. Factor de potencia en un día con luminaria fluorescente y luminaria LED

Conclusiones

El incremento de cargas no lineales en nuestra vida cotidiana nos ha generado un beneficio en muchos aspectos de la vida para las personas pero esto nos ha generado por parte del propio funcionamiento en la electrónica que llevan estos equipos es que se han derivado el problema de las perturbaciones por armónicos en los sistemas de distribución de energía eléctrica, llegando a afectar a otros usuarios por la contaminación de distorsión y dañando la compatibilidad electromagnética de la red, por estos inconvenientes se hace necesario el estudio de las perturbaciones eléctricas generadas por los equipos a los que ya estamos habituados. Los armónicos de los que hablamos son señales con una frecuencia más alta a la del sistema que afecta la eficiencia, la calidad y el funcionamiento del sistema eléctrico.

Por el método que se trabajó se obtuvo la evaluación de las características de distorsión de onda de tensión armónica y corriente lo que permitió la determinación de las características inherentes a la calidad de la energía.

De los datos obtenidos se pudo realizar un análisis de los niveles de distorsión armónica en el sistema eléctrico del edificio A de la UACM San Lorenzo Tezonco. El análisis se realizó con respecto a lo establecido en el código de red de CFE L0000-45 y tomando en cuenta de la norma internacional la IEC 61000-3-2 "*Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16^a per phase)*" para tener un conocimiento más completo de la distorsión en corriente de cada componente. Para el análisis de los datos se tomó en cuenta las recomendaciones del código de red establecidas en la especificación L0000-45 de CFE apéndice B sección B.4.

De acuerdo a los datos obtenidos se puede destacar la presencia de armónicos de corriente de la componente 3^{ra} para la tecnología fluorescente y LED, lo cuales son muy comunes en cargas no lineales por ser un armónico de secuencia cero por lo que es inherente su presencia al estar en fase con la frecuencia fundamental. De la 5^{ta} componente hay un exceso en el neutro tanto en las luminarias fluorescentes y LED, y para cada fase no se cumple con el límite menor a 1.14% establecido en IEC 61000-3-2. Para la séptima componente se obtuvo que el neutro excede lo establecido en el código de red, al exceder el 6% permitido y cada fase no cumplen con la IEC 61000-3-2 al exceder el 0.77% permitido. En el caso de la

11^{va} componente podemos observar que en el neutro excede lo permitido por el código de red, al sobrepasar el 6% y las fases no cumplen con la IEC 61000-3-2 al exceder el 0.33% establecido.

Para el THD de tensión se excede el 8% permisible en las lámparas LED (con un 36.88% en neutro) y en las fluorescentes (con un 38.28% en neutro). La presencia de estos armónicos es debido en gran medida a la forma en que funciona los rectificadores al no poder evitar la generación de armónicos de secuencia cero.

En el caso del THD de corriente se puede observar que ni una de las tecnologías cumple con el límite establecido por el código de red al exceder el 8% permitido. Tomando en cuenta la ficha técnica de las lámparas fluorescentes el THD de corriente debe ser menor a 10% lo que no se cumple en cada fase y porque se obtuvieron registros de 98.09% en el neutro. Para el caso de las lámparas LED se menciona en la ficha técnica que se puede generar hasta un 16% de THD en corriente y esto se cumple para cada fase, pero no en el neutro al tener un 80.97%. Lo que es notable es la disminución de distorsión con el uso de las lámparas led.

Analizar el factor de potencias de cada tecnología nos da una premisa del comportamiento de los armónicos afectan a los sistemas eléctricos, para el caso que se analizó en esta tesis hay una predominancia de niveles de armónicos de corriente de la componente tercera y como consecuencia se van acumulando en el conductor neutro lo que sin duda aumenta la potencia reactiva y en consecuencia no hay un beneficio de potencia efectiva necesaria en el sistema y que eventualmente se genera más corriente absorbida en la acometida y como consecuencia es necesario tener una sección de calibre mayor, circuitos de protección y distribución de mayor calibre.

Con lo visto en los datos obtenidos del factor de potencia, se puede concluir que hubo una disminución en el factor de potencia con el uso de las luminarias LED con un promedio de 0.89, que cumple con lo especificado en la ficha técnica de la luminaria, y un promedio de 0.95 de las luminarias fluorescentes. Por lo que cada tecnología cumple con los datos mencionados en su respectiva ficha técnica (Anexo A y Anexo B)

De los datos obtenidos se puede observar que hay un notable exceso de distorsión en neutro, y lo destacable es que con el uso de las lámparas LED hay una disminución en la distorsión armónica. A pesar de este exceso en distorsión de corriente por el neutro no habría afectaciones a futuro ya que la corriente que circula por el neutro no excede los 10 A y el calibre del neutro puede soportar hasta el triple de amperes.

Con el análisis realizado se puede destacar la importancia de conocer el estado de un sistema donde predominan en gran cantidad las cargas no lineales, debido a las perturbaciones que llegan a generar en el propio sistema y el sistema eléctrico que suministra, afectando las protecciones, transformadores, cableado y demás equipos, lo cual también afecta su funcionamiento y disminuyendo la vida útil del sistema. Tomando en cuenta que el análisis se realizó en el transformador del edificio A, al ser los demás edificios del plantel de la UACM de San Lorenzo Tezonco similares al edificio estudiado, podemos concluir que no habría afectaciones en el sistema eléctrico general del plantel y que se cuenta con lo necesario para tener un sistema de buena calidad que no afecte a los usuarios del plantel. Al tener unas luminarias LED en todos los edificios podemos asegurar que no habrá afectaciones a los equipos de iluminación en el uso prolongado, el cableado tiene el suficiente calibre para soportar y el factor de potencia se mantiene en niveles adecuados.

Referencias

- Barbosa Franco, A., Noguera Vega, L., & Giral Ramírez, W. (Julio-Diciembre de 2017). Análisis de distorsión armónica en iluminación LED. *Revista Vínculos*, 14(2), 95-107. doi:<https://doi.org/10.14483/2322939X.12520>
- A. Burton, H. L. (2017). Led based lighting and communications: An emerging technology for a green more sustainable future. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 4(13), 1-6.
- A. Mansoor, W. G. (1995). An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 467 - 473. doi:10.1109/61.368365
- Acevedo Donoso, F. (s.f.). Componentes armónicas en redes de distribución eléctricas. Conceptos, norma vigente en Chile y alternativas de solución al problema.
- AGN Group. ((s.f.)). Los efectos de los armónicos y sus soluciones. boletín aes soluciones armónicas. Recuperado el 19 de diciembre de 2024, de <https://agngroup.net/papers/boletin%20aes%20soluciones%20armonicos.pdf>
- Angel Silva, M. A., & Ordoñez Plata, G. (diciembre de 2005). Calidad de la Energía Eléctrica: Diseño y Construcción de un Prototipo como Alternativa para la Monitorización de Interrupciones y Caídas de Tensión. *Revista de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas*, 4(2), 75-83. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/5537/553756895005.pdf>
- Arrillaga, J. W. (2003). *Power System Harmonics* (segunda ed.). John Wiley Sons.
- Blanco Castañeda, A. M. (2010). Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y LEDs (light Emitting Diodes). *BibTex*, 138. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11414>
- Boix, O. (1996). Estudio y Modelización en Régimen Permanente de Cargas No Lineales para el Análisis Armónico de Redes Eléctricas. *Tesis Doctoral*. (U. ETSEIB, Ed.) Barcelona.
- Brusil Guamán, M. (Abril de 2020). Análisis de Perturbaciones Armónicas Producidas por Luminarias de Tecnología LED en una Red de Alumbrado Público. Quito.
- Chauvin Arnoux. (Octubre de 2021). Recuperado el Agosto de 2024, de <https://www.chauvin-arnoux.es/sites/default/files/documents/wp-lanorma-clasea.pdf>
- Cheng, Y. K., & Cheng, K. E. (Noviembre de 2006). General study for using LED to replace traditional lighting devices," in Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Power Electronics Systems and Applications. *ICPESA*, pp.173–177.
- CRE. (8 de Abril de 2016). *Comisión Reguladora de Energía*. Obtenido de [https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/SENYMEM/\(DOF%202016-04-08%20CRE\)%20RES-151-2016%20DACG%20C3%B3digo%20de%20Red.pdf](https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/SENYMEM/(DOF%202016-04-08%20CRE)%20RES-151-2016%20DACG%20C3%B3digo%20de%20Red.pdf)

- Cunill Solà, J. (Septiembre de 2017). Estudios y caracterización armónica de las lámparas fluorescentes compactas de baja potencia. Barcelona, España.
- ELECTROCONTROL. (s.f.). Manual del instalador. Obtenido de https://datospdf.com/download/manual-del-instalador-_5ae5d1d9b7d7bcf338eb5133_pdf#modals
- Escobar Mejía , A., Marín Hurtado, A., & Rave Restrepo, S. (s.f.). Mitigación de Armónicos Causados por Iluminación Led Utilizando Filtros Activos. Pereira, Risaralda, Colombia. Recuperado el 19 de mayo de 2022
- Especificación CFE L0000-45 Comisión Federal de Electricidad (CFE). (Enero de 2005). Desviaciones permisibles en las formas e onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica. *Especificación CFE L0000-45*. México. Obtenido de <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/v/L0000-45.pdf>
- Esperanza Gonzalez, M. S., Mata Guerrero, J. A., & Castañeda Ramos , L. A. (julio de 2006). Las cargas no Lineales, su Repercusión en las Instalaciones Eléctricas y sus. *Conciencia Tecnológica*(32). Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/944/94403211.pdf>
- FCEIA. (2015). *Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura*. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/tci/utiles/Apuntes/Cap%2010-TRIF.pdf>
- FLUKE. (2012). Manual de uso 343-II, /435-II/437-II Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica.
- Gómez Expósito, A. (2002). *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*. McGraw-Hill.
- Herrera, J. (1997). Determinación de la Potencia de Transformadores para Alimentar Cargas no Lineales. (E. P. Eléctrica, Ed.) Guayaquil, Ecuador.
- IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-3-2. (2005). Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase). Obtenido de <https://webstore.iec.ch/en/publication/18727>
- IEEE Std 1159-2019. (2019). *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE Std 1159-2019.
- INDALUX. (2012). Manual Luminotecnia. México.
- Lin, S. H. (2016). The Study of the Power Quality Emission and Thir Impacts on Distribution Systems. *IEEE Xplore*, 613-618.
- LUMINOTECNIA. (2002). Manual práctico de INDALUX. Obtenido de https://electrosertec.com/img/cms/INTRODUCCION_A_LA_LUMINOTECNIA.pdf
- Lutron. (12 de Octubre de 2024). Hi-lume 3D. *Fluorescent Dimming Ballasts Hi-lume 3D*. Obtenido de <https://www.lutron.com/asia/Products/Pages/FluorescentBallasts/Hi-Lume3D/Overview.aspx>

- M. Gruz, T. (s.f.). A survey of neutral currents in three-phase computer power systems. Columbus, OH.
- Marquez Avedaño, N. (Marzo de 2005). Diseño y Construcción de un Balastro Electrónico alimentado con CD para encender una Lámpara Fluorescente de 21 Watts. (U. T. Mixteca, Ed.) Oaxaca.
- Márquez Avedaño, N. (2010). Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y LEDs (Light emitting Diodes). Bogotá.
- Martínez Sarmiento, F. H., & Gómez Molano, D. F. (30 de Junio de 2004). Corrección activa del factor de potencia en cargas no lineales. (Tecnura, Ed.) *Tecnura, Tecnología y cultura afirmando el conocimiento*, 7(14), 40–47. Recuperado el Sep de 2024, de <https://doi.org/10.14483/22487638.6184>
- Megahed, T. F., & Kotb, M. F. (2022). Improved design of LED lamp circuit to enhance distribution. *Energy Reports* 8.
- Orellana Valiente, C. A. (Junio de 2011). Análisis de Distorsión Armónica en Redes de Distribución de Energía Eléctrica Utilizando Matlab. Guatemala.
- Philips LED T8 Mains. (23 de Agosto de 2022). *Tubos LED Essential* . Recuperado el 14 de septiembre de 2024, de https://www.lighting.philips.com.mx/prof/lamparas-y-tubos-led/tubos-led/tubos-led-essential-t8-mains/LP_CF_6979508_EU/family
- Philips T8 Estándar. (s.f.). Philips. Recuperado el 12 de octubre de 2024, de https://www.lighting.philips.com.mx/prof/lamparas-y-tubos-convencionales/lamparas-fluorescentes-y-arrancadores/tl-d/t8-estandar/LP_CF_F_T8U_EU/family
- Pinto León, R. A. (s.f.). *Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de academia.edu: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/35610251/Pinto_Rodrigo.-libre.pdf?1416247475=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCorreccion_del_factor_de_potencia_en_cir.pdf&Expires=1727589600&Signature=CjTBIT2~ggI-WRrBRA-ISobl4Te2kyuqeCW2C59EhFeGdik
- Proaño Pérez, N. F., & Velasquez, Z. V. (Marzo de 2010). Estudio de efectos y metodos de minimización de distorsiones armónicas en equipos de distribución electrica, comercial e industrial. Guayaquil. Recuperado el 2022
- Puentes Iregui, R. E. (2004). Evaluación del impacto de lámparas flourescentes con balastos electrónicos en la calidad de la potencia. *Universidad la salle* , 166. Recuperado el 2024, de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1543&context=ing_electrica
- Rivera Sierra, R. (Junio de 2014). Estudio del estado del arte de las lámparas de iluminación LED y su. Barcelona. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/23024>
- Rivera Sierra, R. (Junio de 2014). Estudio del estado del arte de las lámparas de iluminación LED y su comportamiento armónico. Barcelona, España.
- Salazar. (2012). Curso de calidad de la energía. Quito.

- Sarmiento, F. (2001). El fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas. *Revista Tecnura*, 5, 46-54.
- Téllez, E. (2012). Calidad de la energía. Programa de ahorro de energía. Puebla, México. Obtenido de <http://www.waterymex.org>
- Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A., & Hannan, M. (2012). An analysis of Harmonics from LED Lamps. *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility APEMC 2012*. doi:10.1109/APEMC.2012.6238014
- Universidad Tecnológica Nacional. (s.f.). *Manual de Iluminación Eficiente*. Obtenido de <http://www.edutecne.utn.edu.ar/>
- Victor Guevara Del Ángel. (s.f.). *Radthink SA de CV*. Recuperado el 12 de 08 de 2024, de <https://radthink.com.mx/codigo-de-red-calidad-de-la-potencia-parte-1-distorsion-armonica/>
- Vincitorio, B. y. (2012). Incidencia del uso del LFC como cargas no lineales en los sistemas de distribución eléctrico. Mendoza: Instituto regional de estudios sobre energía eficiencia energética.
- Wilkins, A. (Septiembre de 2014). Designing to Mitigate the Effects of Flicker Reducing Risk to Health and Safety. *IEEE Power Electron*, 18-26.
- Yam, F., & Hassan, Z. (2005). Innovative advances in LED technology. *Microelectronics Journal*, 36(2), pp. 129–137.

Anexos

Anexo A. Balastos de atenuación fluorescentes Marca Lutron

Balastos de atenuación fluorescentes

Hi-lume 3D

Atenuación arquitectónica

369280r 3 11.09.17

Especificaciones (continuación)

Rendimiento

- Rango de atenuación: del 100% al 0,7% de salida de luz relativa medida (RLO) para lámparas T8, del 100% al 1% de RLO medida para lámparas T5 y T5HO y del 100% al 5% de RLO medida para lámparas con tubos gemelos T5.
- Encendido de la lámpara: encendido rápido programado.
- Factor de pico de la corriente de la lámpara: inferior a 1,7.
- Parpadeo de la lámpara: no visible.
- Variación de salida de la luz: salida de luz constante de $\pm 2\%$ para variaciones de voltaje de línea de $\pm 10\%$.
- Vida útil de la lámpara: la vida útil promedio de la lámpara cumple o excede los valores nominales de los fabricantes de lámparas.
- Factor de potencia: superior a 0,95.
- Distorsión armónica total (THD) típica menor de 10%*.
- Sobrecorriente máxima: 7 A por balastro con 120 V~, 3 A por balastro con 277 V~
- Voltaje operativo: entrada universal 120, 220/240, 277 V~ a 50/60 Hz
- Frecuencia de operación: superior a 42 KHz.
- Factor de balastro (BF): 1,0/1,17 para lámparas T8 y 1,0 para lámparas T5, T5HO, y lámparas con tubos gemelos T5.

Rango de atenuación para lámparas T5 y T5HO:

| BF | Rango de atenuación ([BF] máx./min.) | Proporción de atenuación |
|-----|--------------------------------------|--------------------------|
| 1,0 | 1,00 / 0,01 | 100:1 |

Rango de atenuación para lámparas T8:

| BF | Rango de atenuación ([BF] máx./min.) | Proporción de atenuación |
|------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1,17 | 1,17 / 0,0085 | 138:1 |
| 1,0 | 1,00 / 0,0085 | 118:1 |


Rango de atenuación para lámparas con tubos gemelos T5:

| BF | Rango de atenuación ([BF] máx./min.) | Proporción de atenuación |
|-----|--------------------------------------|--------------------------|
| 1,0 | 1,00 / 0,05 | 100:5 |

Balastros Hi-lume® 3D para lámparas lineales y curvadas en U modelo T8

Para una buena atenuación, todas las lámparas deben cumplir con los estándares aceptados: 17, 25, 32, y 40 W (NEMA LL9-2009).

No utilizar con lámparas de potencia reducida.

| Tipo de lámpara | Vatios de la lámpara (largo) | Lámparas por balastro | Tamaño de la caja | Número de referencia de Hi-lume® 3D | Voltaje de entrada (V~) | Corriente del balastro (A) | Factor de balastro (BF) | Energía de entrada (W) | Lúmenes del sistema ³ (lm) | Eficacia del sistema ³ (lm/W) | Factor de eficacia del balastro (BEF) | Eficacia relativa del sistema (RSE) |
|--|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| T8 y curvado en U  | 40 W (1 524 mm [60 pulg]) | 1 | C | H3D T840 C U 1 10 | 120 | 0,38 | 1,00 | 43,8 | 3 800 | 87 | 2,28 | 0,91 |
| | | | | | 240 | 0,18 | 1,00 | 43,0 | 3 800 | 88 | 2,33 | 0,93 |
| | | | | | 277 | 0,16 | 1,00 | 42,8 | 3 800 | 89 | 2,34 | 0,94 |
| | | 1 | C | H3D T840 C U 1 17 | 120 | 0,42 | 1,17 | 50,6 | 4 446 | 88 | 2,31 | 0,92 |
| | | | | | 240 | 0,21 | 1,17 | 49,4 | 4 446 | 90 | 2,37 | 0,95 |
| | | | | | 277 | 0,18 | 1,17 | 49,6 | 4 446 | 90 | 2,36 | 0,92 |
| | | 2 | C | H3D T840 C U 2 10 | 120 | 0,76 | 1,00 | 90,9 | 7 600 | 84 | 1,10 | 0,90 |
| | | | | | 240 | 0,37 | 1,00 | 88,4 | 7 600 | 86 | 1,13 | 0,91 |
| | 2 | C | H3D T840 C U 2 17 | 120 | 0,85 | 1,17 | 100,3 | 8 892 | 89 | 1,17 | 0,93 | |
| | | | | 240 | 0,41 | 1,17 | 97,2 | 8 892 | 92 | 1,20 | 0,96 | |
| | 32 W (1 219 mm [48 pulg]) | 1 | C | H3D T832 C U 1 10 ^{1,2} | 120 | 0,32 | 1,00 | 38,5 | 3 000 | 78 | 2,60 | 0,83 |
| | | | | | 240 | 0,16 | 1,00 | 37,7 | 3 000 | 80 | 2,65 | 0,85 |
| | | | | | 277 | 0,14 | 1,00 | 37,6 | 3 000 | 80 | 2,66 | 0,85 |
| | | | G | H3D T832 G U 1 10 ^{1,2,4} | 120 | 0,30 | 1,00 | 34,8 | 3 000 | 86 | 2,87 | 0,92 |
| | | | | | 240 | 0,15 | 1,00 | 35,0 | 3 000 | 86 | 2,85 | 0,91 |
| | | | | | 277 | 0,13 | 1,00 | 35,1 | 3 000 | 85 | 2,85 | 0,91 |
| | | 1 | C | H3D T832 C U 1 17 ^{1,2} | 120 | 0,34 | 1,17 | 40,8 | 3 510 | 86 | 2,87 | 0,92 |
| | | | | | 240 | 0,17 | 1,17 | 40,8 | 3 510 | 86 | 2,87 | 0,92 |
| 277 | | | | | 0,15 | 1,17 | 41,6 | 3 510 | 84 | 2,82 | 0,90 | |
| G | | H3D T832 G U 1 17 ^{1,4} | 120 | 0,34 | 1,17 | 39,7 | 3 510 | 88 | 2,95 | 0,94 | | |
| | | | 240 | 0,17 | 1,17 | 40,0 | 3 510 | 88 | 2,92 | 0,94 | | |
| | | | 277 | 0,15 | 1,17 | 40,1 | 3 510 | 88 | 2,92 | 0,93 | | |
| 2 | | C | H3D T832 C U 2 10 ^{1,2} | 120 | 0,57 | 1,00 | 68,4 | 6 000 | 88 | 1,46 | 0,94 | |
| | | | | 240 | 0,28 | 1,00 | 67,2 | 6 000 | 89 | 1,49 | 0,95 | |
| | | | | 277 | 0,24 | 1,00 | 66,5 | 6 000 | 90 | 1,50 | 0,96 | |
| | | G | H3D T832 G U 2 10 ^{1,2,4} | 120 | 0,58 | 1,00 | 68,9 | 6 000 | 91 | 1,52 | 0,97 | |
| | | | | 240 | 0,28 | 1,00 | 66,3 | 6 000 | 90 | 1,51 | 0,97 | |
| | | | | 277 | 0,24 | 1,00 | 66,5 | 6 000 | 90 | 1,50 | 0,96 | |
| 2 | C | H3D T832 C U 2 17 ^{1,2} | 120 | 0,65 | 1,17 | 78,0 | 7 020 | 90 | 1,50 | 0,96 | | |
| | | | 240 | 0,32 | 1,17 | 76,8 | 7 020 | 91 | 1,52 | 0,98 | | |
| | | | 277 | 0,28 | 1,17 | 77,6 | 7 020 | 91 | 1,51 | 0,97 | | |
| G | H3D T832 G U 2 17 ^{1,4} | 120 | 0,67 | 1,17 | 75,4 | 7 020 | 93 | 1,55 | 0,99 | | | |
| | | 240 | 0,31 | 1,17 | 76,5 | 7 020 | 92 | 1,53 | 0,98 | | | |
| | | 277 | 0,28 | 1,17 | 76,9 | 7 020 | 91 | 1,52 | 0,97 | | | |
| 3 | G | H3D T832 G U 3 10 ^{1,2,4} | 120 | 0,83 | 1,00 | 99,6 | 9 000 | 90 | 1,00 | 0,96 | | |
| | | | 240 | 0,40 | 1,00 | 96,0 | 9 000 | 94 | 1,04 | 1,00 | | |
| 277 | 0,37 | 1,00 | 102,5 | 9 000 | 88 | 0,98 | 0,94 | | | | | |
| 3 | G | H3D T832 G U 3 17 ^{1,4} | 120 | 0,95 | 1,17 | 114,0 | 10 530 | 92 | 1,03 | 0,99 | | |
| | | | 240 | 0,47 | 1,17 | 112,8 | 10 530 | 93 | 1,04 | 1,00 | | |
| 277 | 0,41 | 1,17 | 113,6 | 10 530 | 93 | 1,03 | 0,99 | | | | | |

Notas

- ¹ Se encuentran disponibles modelos que cumplen con la Ley de compras nacionales (Buy American Act, BAA). Agregue una "U" al prefijo del número de modelo al realizar el pedido (por ejemplo: **UH3D T832 C U 1 10**).
- ² Se encuentran disponibles modelos con la certificación NOM. Agregue una "N" al sufijo del número de modelo al realizar el pedido (por ejemplo: **H3D T832 C U 1 10N**).
- ³ Los números reales pueden variar de acuerdo con el modelo de la lámpara. Consulte al fabricante de la lámpara para obtener los datos específicos.
- ⁴ No para venta en California - Consulte información acerca de modelos alternativos en la Nota de uso #601 de Lutron, **Reglamento del Título 20 de CEC**.

Anexo B. Tubos LED Essential T8 Marca Philips

Tubos LED Essential T8 Mains

CorePro LEDtube HO 1200mm 18W865 VWV T8

Essential LEDtube es una solución LED asequible que resulta adecuada para reemplazar fácilmente las lámparas fluorescentes T8. Gracias a su diseño único, el tubo LED Philips Essential T8 Mains se puede instalar directamente en luminarias que funcionan con conexión de tensión de red. El producto brinda un efecto de iluminación natural para uso en aplicaciones de iluminación general, así como ahorros de energía instantáneos. Es una solución ecológica.

Datos del producto

| Funcionamiento de emergencia | | Power (Rated) (Nom) | |
|---|----------------------------------|--|-----------|
| Tapa y base | G13 [Medium Bi-Pin Fluorescent] | | 18 W |
| Cumple con el reglamento RoHS de la UE | Si | Corriente de la lámpara (máx.) | 183 mA |
| Vida útil nominal (nominal) | 30000 h | Corriente de la lámpara (mín.) | 68 mA |
| Ciclo de alternado | 200000X | Tiempo de inicio (nominal) | 0,5 s |
| | | Tiempo de calentamiento para 60 % de luz (nominal) | 0,5 s |
| Rendimiento inicial (conforme con IEC) | | Factor de potencia (nominal) | |
| Código de color | 865 [CCT de 6.500 K] | | 0,9 |
| Angulo de haz (nominal) | 240 ° | Voltaje (nominal) | 100-277 V |
| Flujo luminoso (nominal) | 2100 lm | Temperatura | |
| Designación de color | Luz de día fría | T° ambiente (máx.) | 45 °C |
| Temperatura de color correlacionada (nominal) | 6500 K | T° ambiente (mín.) | -20 °C |
| Eficacia luminica (promedio) (nominal) | 116,00 lm/W | T° almacenamiento (máx.) | 65 °C |
| Consistencia de color | <6 | T° almacenamiento (mín.) | -40 °C |
| Índice de reproducción de color (Nom) | 80 | T° estuche máxima (nominal) | 55 °C |
| LLMF At End Of Nominal Lifetime (Nom) | 70 % | Controles y regulación | |
| | | Con regulación de intensidad | No |
| Mecánicos y de carcasa | | | |
| Frecuencia de entrada | 50 a 60 Hz | | |

Datasheet, 2021, Marzo 25

Datos sujetos a cambios

Sphere-Spectroradiometer Method

| Parameter | Result | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | |
| Test Voltage (V) | 120.0 | 100.0 | 277.0 | 220.0 | 240.0 |
| Voltage frequency (Hz) | 60 | 60 | 60 | 50 | 50 |
| Test Current (A) | 0.144 | 0.178 | 0.068 | 0.080 | 0.074 |
| Power Factor | 0.9754 | 0.9547 | 0.9050 | 0.9575 | 0.9443 |
| Test Power (W) | 16.88 | 16.99 | 16.96 | 16.75 | 16.79 |
| THD A% | 20.09 | 29.62 | 16.00 | 12.93 | 13.91 |