



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estudio comparativo de análisis lumínico y parámetros eléctricos entre lámparas tipo led y mercurio de alta presión. Caso aplicativo: Sistema de iluminación de vías peatonales – UDEP

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Hugo Arnaldo Linares Carrión

Asesor:
Mgtr. Ing. José Hugo Fiestas Chévez

Piura, agosto de 2024

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Hugo Arnaldo Linares Carrión, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 75540043.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"Estudio comparativo de análisis lumínico y parámetros eléctricos entre lámparas tipo led y mercurio de alta presión. Caso aplicativo: Sistema de iluminación de vías peatonales – UDEP"
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniero Mecánico Eléctrico.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Mgtr. Ing. José Hugo Fiestas Chévez, identificado con DNI N° 80543428
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 02/09/2024.



.....
Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.



Dedicatoria:

*A mis padres y hermanas por apoyarme
e inspirarme durante toda mi carrera
profesional, y por ser mi motivación
para salir adelante.*

*Al amor de mi vida Nancy Salazar por
siempre estar junto a mí en las buenas y
en las malas, y ser mi razón para tener
un vida más próspera y feliz.*

Agradecimientos

A Dios y a la virgen por guiarme y darme la fuerza para seguir adelante.

A la Universidad de Piura, por formarme y prepararme profesionalmente.

A mi asesor, profesores y amigos por acompañarme y apoyarme durante mi carrera profesional.



Resumen

Actualmente, la Universidad de Piura - Campus Piura posee en su sistema de iluminación en vías peatonales que utiliza lámparas de mercurio de alta presión (HPL-N 125W/542 E27). El uso de estas lámparas en las instalaciones de alumbrado ha disminuido significativamente en los últimos años, debido a que está siendo reemplazada por la tecnología de iluminación con lámparas tipo LED (Light Emitting Diode). Ante esto, el Área de Mantenimiento del Campus Piura requiere evaluar de modo integral el proyecto de reemplazo de tecnología de iluminación a lámparas LED (LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR).

Es conocido el beneficio en ahorro de energía por el cambio a lámparas LED, con la consecuente disminución en la facturación eléctrica. Sin embargo, es necesario evaluar el impacto en modo integral: consumo de energía, facturación eléctrica, niveles de iluminación, uniformidad de iluminación y calidad de energía.

Ante esta problemática en esta investigación se desarrolla un estudio comparativo de análisis lumínico y parámetros eléctricos entre las lámparas tipo mercurio de alta presión y las lámparas tipo led, tomando como objeto de estudio el circuito de iluminación de la vía peatonal que va desde el Edificio 80 hacia Edificio de Gobierno.

En el análisis de consumo energético se tienen que la lámpara de mercurio de alta presión tiene un consumo en potencia de 134 W, a 220 V, lo que significa un consumo de energía de 1.6 kWh diarios; mientras que la lámpara led tiene un consumo de potencia de 16 W y de energía 0.20 kWh, en las mismas condiciones. Es decir, la relación de consumo es aproximadamente de 8 a 1.

Al analizar los niveles de iluminación se obtuvo valores de 9.1 lux, cuando se utiliza lámparas de mercurio de alta presión, y 3.6 lux, en el caso del uso de las lámparas led. En ambos casos estos valores superan lo indicado en la norma técnica DGE de Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución, que establece un requerimiento de iluminación mínima de entre 1 y 3 luxes.

Finalmente, en el estudio de calidad de energía, en lo concerniente a la inyección de componentes armónicas del sistema de iluminación, se observó que la lámpara de mercurio de alta presión tuvo una demanda de distorsión total (TDD%) del 19.9%, mientras que la lámpara LED registró un TDD% de 130.1%. Esta notable diferencia evidencia que las lámparas LED generan una mayor cantidad de perturbaciones armónicas en comparación con las lámparas de mercurio de alta presión.

En conclusión, la utilización de lámparas LED permite una reducción del consumo de energía del sistema del 87.5% en comparación con las lámparas de mercurio de alta presión. A pesar de que los niveles de iluminación generados por las lámparas LED son aproximadamente un tercio de los alcanzados por las lámparas de mercurio, en ambos casos, los valores de iluminación superan los requisitos establecidos por la normativa nacional. No obstante, es

importante considerar la implementación de filtros que mitiguen la perturbación armónica ocasionada por las lámparas LED.



Tabla de contenido

Introducción.....	11
Capítulo 1 Magnitudes Luminotécnicas	13
1.1 Flujo Luminoso	13
1.1.1 <i>Intensidad luminosa</i>	13
1.1.2 <i>Iluminancia</i>	13
1.1.3 <i>Curva Fotométrica</i>	14
1.1.4 <i>Deslumbramiento</i>	15
1.2 Tipo de fuentes luminosas	16
1.2.1 <i>Bombilla incandescente</i>	16
1.2.2 <i>Fotoluminiscentes</i>	17
1.2.3 <i>Electroluminiscentes</i>	17
1.3 Potencia y energía eléctrica	19
1.3.1 <i>Potencia y energía activa</i>	19
1.3.2 <i>Potencia y energía reactiva</i>	19
1.3.3 <i>Potencia compleja</i>	19
1.4 Calidad de Energía.....	20
1.4.1 <i>Tipo de perturbaciones</i>	20
1.4.2 <i>Armónicos</i>	21
Capítulo 2 Estudio Comparativo de lámparas.....	23
2.1 Caracterización de Lámparas	23
2.1.1 <i>Caracterización de lámparas según ficha técnica</i>	23
2.1.2 <i>Caracterización de lámparas mediante ensayos en laboratorio</i>	28
2.2 Análisis de Circuito de Iluminación.	33
2.2.1 <i>Descripción del sistema de iluminación peatonal.</i>	33
2.2.2 <i>Análisis lumínico de sistemas de iluminación.</i>	35
2.2.3 <i>Análisis de calidad de energía.</i>	42
2.2.4 <i>Cuadro comparativo entre lámparas</i>	70
2.3 Discusión de resultados.....	72
Conclusiones.....	74
Referencias.....	75

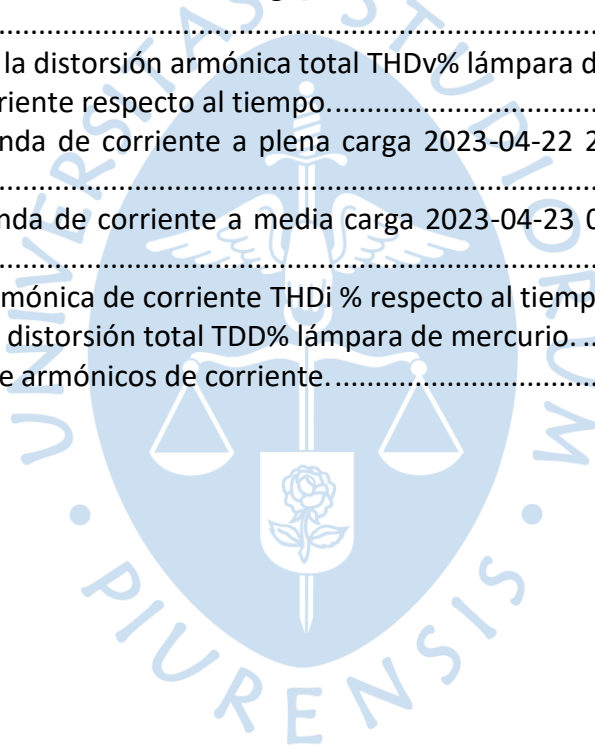
Lista de tablas

Tabla 1 Parámetros eléctricos obtenidos en laboratorio electrotecnia - lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24.....	33
Tabla 2 Parámetros eléctricos obtenidos en laboratorio electrotecnia - lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR	33
Tabla 3 Especificaciones técnicas de luxómetro empleado para mediciones en campo	36
Tabla 4 Tipos de alumbrado según la clasificación vial.....	37
Tabla 5 Niveles de luminancia, iluminancia e índice de control de deslumbramiento	38
Tabla 6 Resumen de resultados de mediciones de iluminancia de LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR . Unidades (Lux).	40
Tabla 7 Resumen de resultados de mediciones de iluminancia de lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24. Unidades (Lux).....	41
Tabla 8 Desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida.	46
Tabla 9 Evaluación de calidad de tensión y desbalance de tensión lámpara led.	46
Tabla 10 Mediciones de nivel de tensión tiempo de integración 10 minutos lámpara led....	47
Tabla 11 Parámetros de distorsión armónica total segun NTCSE.....	48
Tabla 12 Distorsión armónica total tensión lámpara led THD v	49
Tabla 13 Mediciones de corriente tiempo de integración 10 minutos lámpara led	51
Tabla 14 Distorsión armónica de corriente THDi % lámpara led	54
Tabla 15 Demanda de distorsión total TDD % lámpara led	55
Tabla 16 Evaluación de TDD lámpara led	56
Tabla 17 Análisis de armónicos de corriente respecto a la fundamental lámpara led.....	57
Tabla 18 Evaluación de calidad de tensión y desbalance de tensión lámpara de mercurio ...	58
Tabla 19 Mediciones de nivel de tensión tiempo de integración 10 minutos lámpara de mercurio	59
Tabla 20 Parámetros de distorsión armónica total segun NTCSE lámpara de mercurio.....	61
Tabla 21 Distorsión armónica total tensión THD v lámpara de mercurio.....	61
Tabla 22 Mediciones de corriente tiempo de integración 10 minutos lámpara de mercurio.	63
Tabla 23 Distorsión armónica de corriente THDi % lámpara de mercurio	66
Tabla 24 Demanda de distorsión total TDD % lámpara de mercurio.	67
Tabla 25 Evaluación de TDD lámpara de mercurio.	68
Tabla 26 Análisis de armónicos de corriente respecto a la fundamental.....	70
Tabla 27 Cuadro comparativo entre Lámparas.....	70

Lista de figuras

Figura 1 Intensidad luminosa	13
Figura 2 Luxómetro AEMC CA811	14
Figura 3 Curva fotométrica.....	15
Figura 4 Bombilla incandescente.	16
Figura 5 Principio de funcionamiento del “LED”	18
Figura 6 Diversas empresas proveedoras de luminarias de alumbrado público Led.	19
Figura 7 Triangulo de potencia.....	20
Figura 8 Clasificación de las perturbaciones que afectan la calidad eléctrica según IEEE 1159 – 2009.....	21
Figura 9 Generación de armónico en el sistema eléctrico.....	22
Figura 10 Lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24.	25
Figura 11 Lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR.	28
Figura 12 Vatímetro Digital “LUTRON DW6163”	29
Figura 13 Multímetro digital “UNI-T UT89X”	30
Figura 14 Variac Trifásico de “3kVA ENERGIT EN-TSGC3K”	31
Figura 15 Esquema de conexión de circuito - lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24	31
Figura 16 Esquema de conexión de circuito - lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24	32
Figura 17 Esquema de conexión de circuito - lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR.	32
Figura 18 Plano de recorrido de luminarias del circuito de iluminación de la Universidad de Piura	34
Figura 19 Tablero de aire acondicionado y sistema de iluminación - exterior Edificio 80.	34
Figura 20 Protocolo de medición de iluminancia de vía peatonal.....	35
Figura 21 Puntos de cálculos de iluminancia	36
Figura 22 Luxómetro AEMC CA811	37
Figura 23 Tramo de vía peatonal entre edificio de gobierno, humanidades y edificio 80	39
Figura 24 Ubicación y distribución de puntos para análisis lumínico lámpara LED.....	39
Figura 25 Plano de recorrido de luminarias el circuito de iluminación de la Universidad de Piura.	40
Figura 26 Ubicación y distribución de puntos para análisis lumínico de lámpara de mercurio.	41
Figura 27 Analizador de redes Sonel PQM 702.....	43
Figura 28 Selección de conexión para configuración de analizador de redes Sonel PQM 702.	44
Figura 29 Instalación de analizador de redes Sonel PQM 702 en tablero aire acondicionado y sistema de iluminación - exterior edificio 80.....	45
Figura 30 Nivel de tensión respecto al tiempo entre fases y respecto al neutro lámpara led.48	
Figura 31 Forma de onda de tensión a plena carga 2023-04-22 21:50:00.161 lámpara led..	49
Figura 32 Forma de onda de tensión a media carga 2023-04-23 02:20:00.060 lámpara led..	50
Figura 33 Forma de onda de tensión sin carga 2023-04-23 11:50:00.194 lámpara led	50
Figura 34 Variación de la distorsión armónica total THDv% lámpara led.....	51
Figura 35 Nivel de corriente respecto al tiempo.....	52
Figura 36 Forma de onda de corriente a plena carga 2023-04-26 20:50:00.005 lámpara led	53

Figura 37 Forma de onda de corriente a media carga 2023-04-27 03:50:00.193 lámpara led.	53
Figura 38 Distorsión armónica de corriente THDi % respecto al tiempo lámpara led	55
Figura 39 Demanda de distorsión total TDD% lámpara led	56
Figura 40 Evaluación de armónicos de corriente lámpara led	57
Figura 41 Reporte de interrupciones	58
Figura 42 Nivel de tensión máximo y mínimo tiempo de integración 10 minutos lámpara de mercurio	59
Figura 43 Nivel de tensión respecto al tiempo entre fases y respecto al neutro lámpara de mercurio	60
Figura 44 Forma de onda de tensión a plena carga 2023-04-22 21:50:00.161 lámpara de mercurio	61
Figura 45 Forma de onda de tensión a media carga 2023-04-23 02:20:00.060 lámpara de mercurio	62
Figura 46 Forma de onda de tensión sin carga 2023-04-23 11:50:00.194 lámpara de mercurio	62
Figura 47 Variación de la distorsión armónica total THDv% lámpara de mercurio	63
Figura 48 Nivel de corriente respecto al tiempo	64
Figura 49 Forma de onda de corriente a plena carga 2023-04-22 21:50:00.161 lámpara de mercurio	65
Figura 50 Forma de onda de corriente a media carga 2023-04-23 02:20:00.021 lámpara de mercurio	65
Figura 51 Distorsión armónica de corriente THDi % respecto al tiempo lámpara mercurio...	67
Figura 52 Demanda de distorsión total TDD% lámpara de mercurio.	69
Figura 53 Evaluación de armónicos de corriente.	69



Introducción

En un mundo donde la eficiencia energética y la sostenibilidad son cada vez más importantes, elegir el sistema de iluminación adecuado se ha vuelto crucial tanto para hogares como para empresas. Las lámparas LED (diodo emisor de luz) se han destacado por su alta eficiencia energética, larga durabilidad y menor impacto ambiental. Sin embargo, las lámparas de mercurio de alta presión, a pesar de ser una tecnología más antigua, todavía son populares por su capacidad de producir una luz potente y uniforme.

Este estudio se enfoca en comparar las características lumínicas y los parámetros eléctricos entre las lámparas LED y las lámparas de mercurio de alta presión. La investigación se centra en varios aspectos clave:

Eficiencia energética: Evaluación del consumo de energía y la eficiencia de conversión de electricidad a luz en cada tipo de lámpara.

Calidad de iluminación: Análisis de la intensidad y calidad de la luz, medida en lúmenes, y su distribución en diferentes ambientes.

Generación de armónicos: Estudio de la distorsión armónica que cada tipo de lámpara introduce en la red eléctrica y su impacto en la calidad de la energía.

Impacto ambiental: Comparación del impacto ambiental, considerando el manejo de residuos y la huella de carbono.

Costos operativos y de mantenimiento: Análisis de los costos relacionados con la operación y el mantenimiento, incluyendo la vida útil y la necesidad de reemplazo de cada tipo de lámpara.

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron los equipos de medición: analizador de redes y luxómetro, realizando el análisis en circuito de iluminación de vía peatonal campus Piura. Así mismo se realizó ensayos en laboratorio empleando equipos de medición tales como: vatímetro, pinza amperimétrica, variac. El analizador de redes permitió medir y registrar diversos parámetros eléctricos, potencia eléctrica, la generación de armónicos y la estabilidad de la tensión. El luxómetro, por otro lado, se empleó para medir los niveles de iluminancia y cómo se distribuye en el caso aplicativo de la vía peatonal en las instalaciones de la Universidad de Piura.

El principal objetivo de este estudio es ofrecer una comparación detallada y comprensible que ayude a los usuarios a elegir el sistema de iluminación que mejor se adapte de acuerdo al caso aplicativo de la vía peatonal en la Universidad de Piura. Al mismo tiempo, se pretende resaltar las ventajas y desventajas de cada tecnología, fomentando así el uso de soluciones más eficientes y sostenibles.

Mediante un enfoque meticuloso y el análisis de datos reales, esta tesis busca aportar conocimientos valiosos en el campo de la iluminación y la calidad de la energía, promoviendo prácticas que beneficien tanto a los usuarios finales como al medio ambiente.



Capítulo 1

Magnitudes Luminotécnicas

1.1 Flujo Luminoso

De acuerdo con la función de luminosidad relevante, el flujo luminoso es la percepción del ojo humano de una luz visible producida por una fuente de energía radiante en un segundo, cuya letra griega phi (ϕ) es la representación de su simbología y su unidad de medida es en lúmenes. Esta unidad de medida, según el sistema internacional de unidades, es descrito como el flujo luminoso emitido por una fuente de radiación monocromática de 540.1012 Hz y un flujo radiante de 1/683 W.

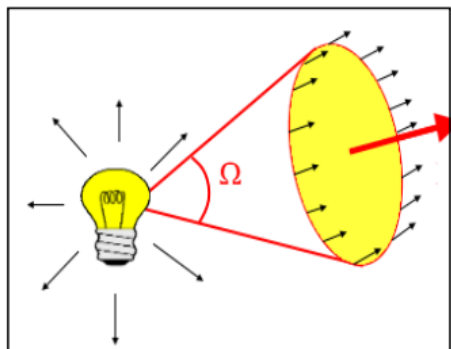
La eficiencia luminosa de una fuente de luz relaciona el flujo emitido por esta fuente con la potencia eléctrica consumida para conseguirlo. Se representa mediante la letra griega epsilon ε y se mide en lm/W. (Martínez, 2020)

$$\varepsilon = \frac{\phi}{P} \quad (\text{lm} / \text{W})$$

1.1.1 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa se refiere al flujo de luminoso distribuido en una dirección específica por una fuente luminosa para un ángulo sólido equivalente a un estereorradián. La intensidad luminosa se mide en candelas (cd), que es una unidad base del Sistema Internacional de Unidades.

Figura 1
Intensidad luminosa



Nota: (Alfaro, 2018)

1.1.2 Iluminancia

La iluminancia se define como la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en relación con el área (S) sobre la cual se proyecta. Se simboliza con la letra E y se expresa en lux (lx). Según el Sistema Internacional de Unidades (SI), un lux se define como la iluminancia de una superficie cuando sobre ella incide un flujo luminoso de 1 lumen distribuido uniformemente en un metro cuadrado de esa área.

$$E = \frac{\phi}{S} \quad (lx = \frac{lm}{m^2})$$

Para medir la iluminancia se utiliza un dispositivo conocido como luxómetro. Este dispositivo está equipado con una celda fotoeléctrica que produce una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de la luz que llega a su superficie. Esta señal eléctrica es luego interpretada y mostrada directamente en una pantalla como un valor en luxes.

Figura 2

Luxómetro AEMC CA811



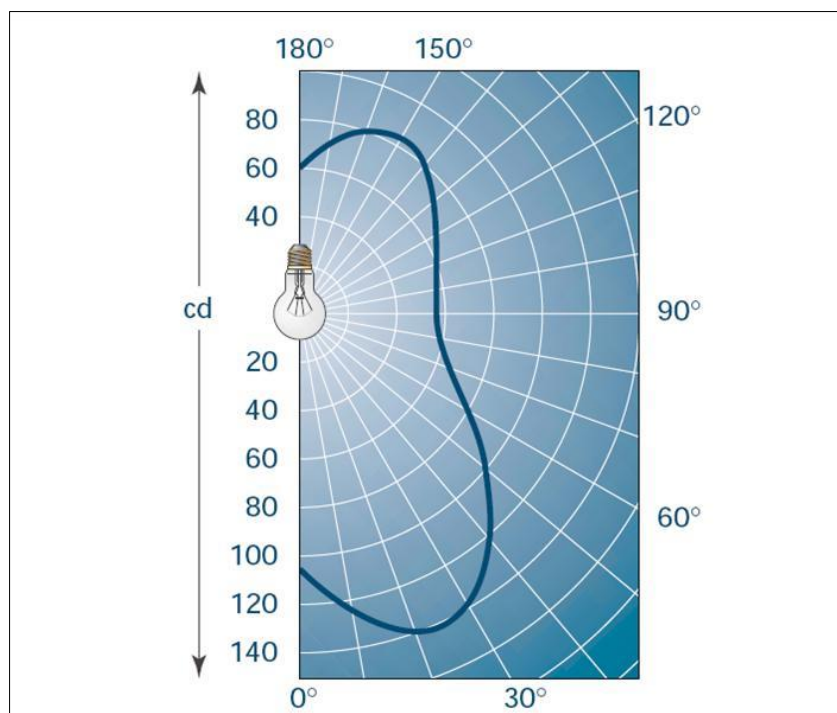
Nota: (AEMC, 2024)

1.1.3 Curva Fotométrica

La curva fotométrica de una fuente de luz proporciona información detallada sobre cómo se distribuye la intensidad luminosa en diferentes direcciones desde la luminaria. Esta información es crucial para realizar cálculos precisos de iluminación, ya que permite determinar con exactitud la intensidad luminosa en cualquier dirección específica.

Las curvas fotométricas es la distribución de luz en una serie de planos que tienen en su centro la luminaria, estos planos se generan al cortar el sólido fotométrico. Estas curvas describen la distribución de la intensidad luminosa proyectada sobre dicho plano.

Figura 3
Curva fotométrica



Nota: (Alfaro, 2018)

1.1.4 Deslumbramiento

En ciertas situaciones, el resplandor generado por las luces puede tener el potencial de afectar la visión. Este resplandor se clasifica generalmente según el efecto que causa en las personas, ya sea incapacitante o incómodo. En el diseño de sistemas de iluminación pública, se presta especial atención al deslumbramiento incapacitante, dado que su control adecuado también neutraliza el deslumbramiento incómodo.

El parámetro fotométrico clave en este contexto es el Incremento de Umbral (TI). Es importante destacar que el control del deslumbramiento está estrechamente vinculado a la luminancia en la calzada. El valor de TI se determina buscando un equilibrio entre un control efectivo del deslumbramiento y una distancia de instalación económica de las luminarias. Para lograr un control de deslumbramiento óptimo, es necesario utilizar luminarias con un valor de TI muy bajo (alrededor del 10%). Sin embargo, estas luminarias dirigen su luz hacia la superficie con un ángulo muy reducido, lo que significa que se debe reducir la distancia entre ellas para mantener la luminancia general y su uniformidad sin comprometer el control del deslumbramiento. (Martinez, 2020).

El incremento de umbral se calcula considerando una luminaria nueva y el flujo luminoso inicial de la lámpara, utilizando la siguiente fórmula:

$$TI = \frac{KxEg}{(Lprom)^{0.8} \times \theta^2} (\%)$$

Donde:

Eg : Iluminancia total inicial producida por las luminarias, en su estado nuevo.

$Lprom$: Luminancia promedio.

K : Constante dependiente de la edad en años (A) del observador, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = 641[1 + (\frac{A}{66.4})^4]$$

1.2 Tipo de fuentes luminosas

1.2.1 Bombilla incandescente

Estas fuentes de luz se caracterizan por su principio de emisión mediante incandescencia, utilizando un pequeño filamento típicamente hecho de wolframio o tungsteno. Este filamento alcanza su temperatura de incandescencia cuando se hace pasar una corriente adecuada a través de él. (Gudilec, 2010)

Figura 4

Bombilla incandescente



Nota: (Gudilec, 2010)

De este modo, la potencia eléctrica consumida por estas fuentes luminosas varía, dependiendo del grosor del filamento; a mayor potencia requerida, se necesita un filamento de mayor grosor.

1.2.2 Fotoluminiscentes

1.2.2.1 Lámpara de descarga de mercurio de alta presión. La operación de una lámpara de mercurio se fundamenta en la generación de un arco eléctrico a través de mercurio elemental bajo vacío. Los átomos de mercurio excitados se vaporizan rápidamente, emitiendo luz ultravioleta que es absorbida por un recubrimiento de fósforo en polvo dentro del vidrio cilíndrico de la lámpara. Este fósforo, al ser excitado, emite luz visible.

Existen dos tipos de lámparas de mercurio, alta y baja presión, que difieren en sus condiciones de operación. Así lo afirma (Suntencun, 2010). Las lámparas de baja presión predominantemente emiten radiaciones ultravioletas en la banda de 253.7nm, mientras que las de alta presión, con mayor presión de vapor, emiten un espectro más amplio que incluye bandas correspondientes a colores como violeta (405nm), azul (435nm), verde (546nm) y amarillo (570nm), además de una pequeña cantidad de radiaciones ultravioleta.

Es por eso que para aplicaciones de alumbrado público se prefiere a las lámparas de alta presión. Sin embargo, debido a la deficiencia de radiaciones rojas en su espectro, las radiaciones ultravioletas se convierten en radiaciones rojas mediante fósforos fluorescentes. Esto mejora significativamente el rendimiento cromático de la lámpara, proporcionando una luz más equilibrada y adecuada para iluminación.

1.2.3 Electroluminiscentes

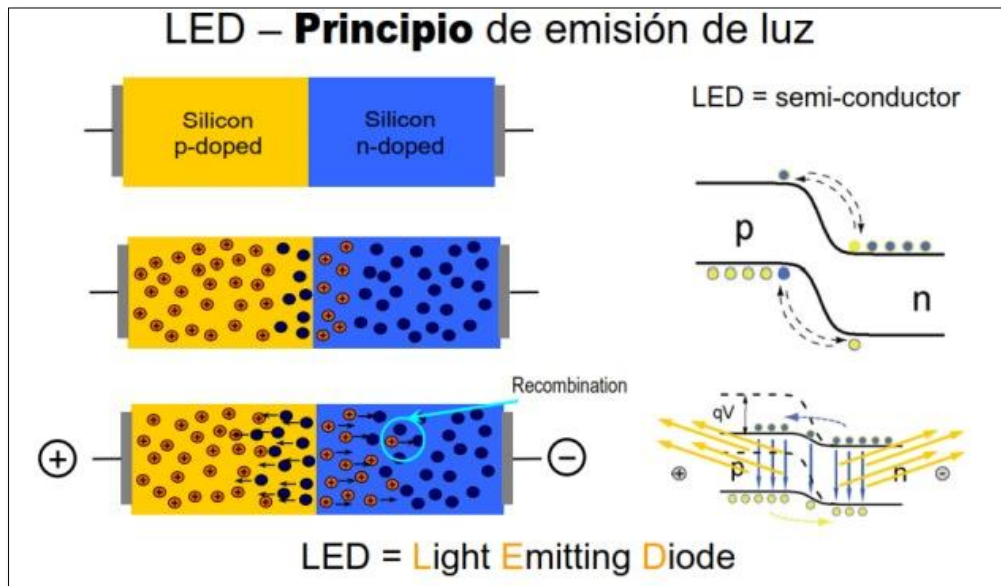
1.2.3.1 LED (Light-Emitting Diode). Los LEDs, o Diodos de Emisión de Luz, son dispositivos electrónicos que consisten en dos semiconductores, comúnmente silicio, dopados de manera diferente. Uno de ellos está dopado tipo P, donde los portadores de carga principales son los huecos, generados por la adición de un material trivalente que deja vacantes en los enlaces. Estos huecos actúan como portadores de carga positiva. Por otro lado, el otro semiconductor está dopado tipo N, con electrones libres como portadores principales, generados por la adición de un material pentavalente que proporciona un electrón libre por átomo dopado. Estos electrones libres son portadores de carga negativa en el dispositivo.

Así que el diodo consiste en una unión tipo PN, que presenta una barrera en la unión entre ambos semiconductores dopados. Esta barrera impide el paso de portadores de carga negativa hacia los positivos. Sin embargo, este principio es fundamental para el funcionamiento característico del diodo, esencial en electrónica. Cuando se polariza directamente, es decir, se aplica un potencial mayor en la unión P y uno menor en la unión N, se genera un flujo de electrones que inicialmente atraviesa la unión N. Esto aumenta el flujo de electrones y reduce la barrera entre las uniones, permitiendo que los electrones libres de la unión N, pasen hacia los huecos de la unión P, facilitando así la conducción eléctrica.

En contraste, si se polariza indirectamente, con un potencial mayor en la unión N y menor en la unión P, los electrones generados por la polarización fluyen directamente hacia la unión P, aumentando la barrera de la unión y evitando la conducción de corriente. Este comportamiento es crucial para la funcionalidad del diodo, ya que permite controlar y dirigir el flujo de corriente eléctrica de manera efectiva en circuitos electrónicos.

Figura 5

Principio de funcionamiento del "LED"



Nota: (Osinergmin, 2013)

Es así que la luz emitida por los LEDs se produce cuando las uniones P-N están polarizadas directamente, lo que facilita el movimiento de electrones a través de la barrera. Cuando los electrones atraviesan esta barrera, liberan energía en forma de fotones. Estos fotones, a su vez, generan radiación electromagnética dentro del rango del espectro visible, lo que resulta en la emisión de luz visible. Este proceso es fundamental para la operación de los LEDs como fuentes de luz eficientes y de bajo consumo en una amplia gama de aplicaciones.

1.2.3.1.1. Luminarias LED de alumbrado público. Todas las luminarias LED están diseñadas con formas innovadoras para distribuir de manera efectiva el flujo luminoso que emiten las lámparas. En el caso de las lámparas, están compuestas por conjuntos de LEDs dispuestos típicamente en una matriz para generar un mayor flujo luminoso. Lo notable de estas luminarias es su capacidad para emitir un flujo luminoso considerable utilizando relativamente menos potencia eléctrica en comparación con otras luminarias que ofrecen el mismo nivel de iluminación.

Figura 6

Diversas empresas proveedoras de luminarias de alumbrado público Led



Nota: (Products Philips, 2017)

De este modo las empresas de diseño de luminarias han adoptado la tecnología LED de manera innovadora para aplicarla en sistemas de alumbrado público. Algunas de estas empresas incluyen Schröder, Philips, entre otras.

1.3 Potencia y energía eléctrica

1.3.1 Potencia y energía activa

La potencia activa (P) es la potencia promedio, medida en watts, que se entrega a una carga y es la única potencia que realiza un trabajo útil. Es la verdadera potencia que se disipa en la carga, y su unidad de medida es el watt (W). (Alexander & Sadiku , 2013)

La potencia activa multiplicada por el tiempo define la energía activa, que se mide en vatios-hora (Wh) o en sus múltiplos, kilovatio-hora (kWh), megavatio-hora (MWh), etc.

1.3.2 Potencia y energía reactiva

La potencia reactiva (Q) representa el intercambio de energía entre la fuente y la componente reactiva de la carga. Su unidad es el volt-amperio reactivo (VAR). Por su parte, la energía reactiva es el resultado de integrar la potencia reactiva en el tiempo, y se mide en volt-amperio reactivo hora (VARh) o en sus múltiplos. (Alexander & Sadiku , 2013)

1.3.3 Potencia compleja

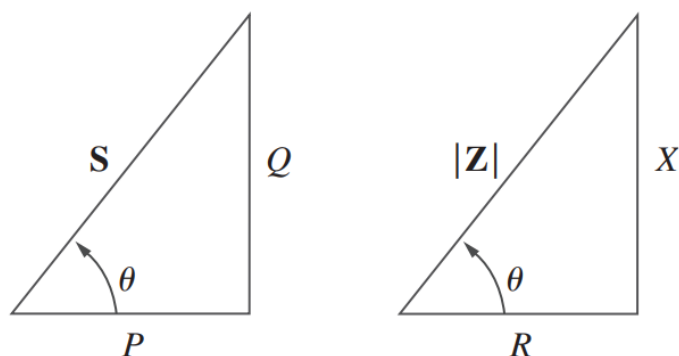
La potencia compleja, medida en voltios-amperios (VA), se obtiene al multiplicar el fasor de la tensión rms por el conjugado complejo del fasor de la corriente rms. Como magnitud compleja, su componente real corresponde a la potencia activa (P), mientras que su componente imaginaria corresponde a la potencia reactiva (Q).

Es habitual representar S , P y Q mediante un triángulo conocido como el triángulo de potencia, como se muestra en la figura 7. Este triángulo incluye cuatro elementos: la potencia aparente o compleja, la potencia real, la potencia reactiva y el ángulo del factor de potencia.

Conociendo dos de estos elementos, es posible calcular fácilmente los otros dos a partir del triángulo.

Cuando el ángulo θ se encuentra en el primer cuadrante, se presenta una carga inductiva con un factor de potencia retrasado. Si S está en el cuarto cuadrante, la carga es capacitiva y el factor de potencia está adelantado. La potencia compleja también puede situarse en el segundo o tercer cuadrante, pero esto implica que la impedancia de carga debe tener una resistencia negativa, lo cual solo es factible con circuitos activos. (Alexander & Sadiku, 2013)

Figura 7
Triángulo de potencia



Nota: (Alexander & Sadiku, 2013)

1.4 Calidad de Energía

Cuando un equipo electrónico opera dentro de los límites establecidos y no altera la señal suministrada en términos de corriente, voltaje o frecuencia, se considera que posee una buena calidad eléctrica. Por el contrario, si presenta perturbaciones que modifican la señal eléctrica establecida, se enfrenta a problemas de calidad eléctrica que pueden resultar en daños a los equipos a corto o mediano plazo.

Según (Collins, 2008), la calidad de energía abarca una amplia gama de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y corriente en un momento y lugar determinados dentro del sistema de energía. Según Ramírez Castaño y Cano Plata (2004) se evalúa la electricidad en un punto específico del sistema eléctrico respecto a parámetros técnicos de referencia.

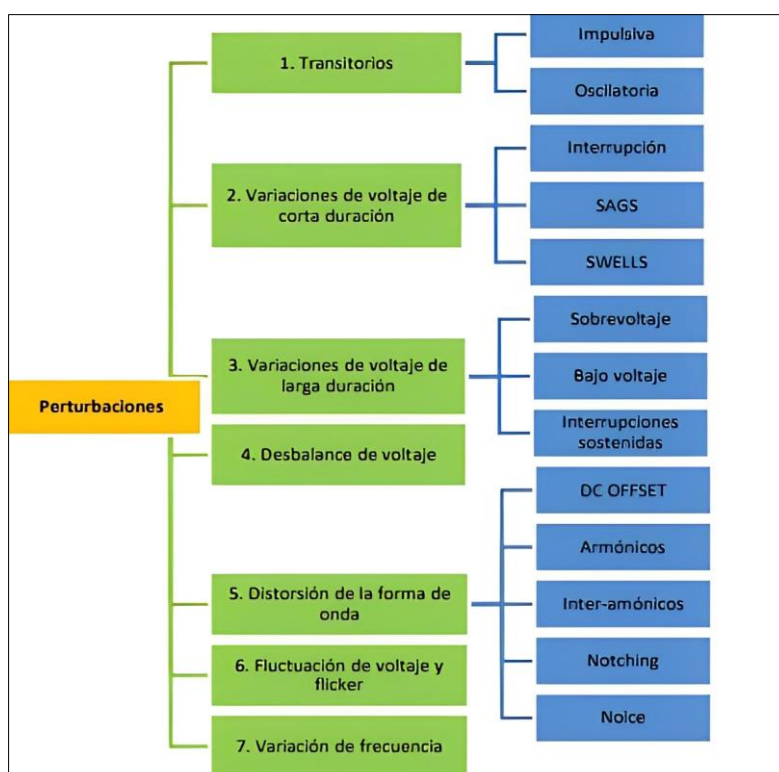
1.4.1 Tipo de perturbaciones

El sistema eléctrico es susceptible a diversos eventos que pueden causar anomalías o funcionamientos inadecuados de los equipos, derivados de alteraciones en parámetros como tensión, corriente y potencia. Estos eventos se conocen como "perturbaciones" y serán el foco de estudio en esta sección.

Las perturbaciones suelen ser generadas por equipos eléctricos que utilizan componentes basados en electrónica de potencia. Estas perturbaciones pueden ser especialmente perjudiciales para equipos sensibles a la variación de tensión. De este modo existen variaciones afectadas por estas perturbaciones, las cuales están relacionadas con la amplitud, frecuencia y forma de onda de la electricidad. Estas categorías están definidas por instituciones internacionales como el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, IEC y normativa nacional como la NTCSE “Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos”.

Figura 8

Clasificación de las perturbaciones que afectan la calidad eléctrica según IEEE 1159 – 2009



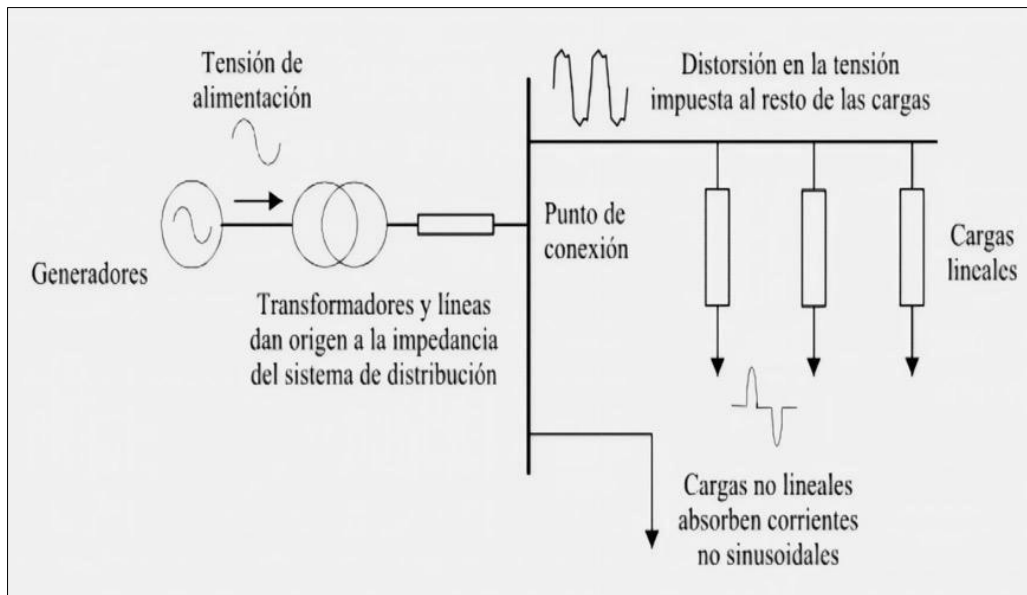
Nota: (García, 2020)

1.4.2 Armónicos

Las perturbaciones armónicas surgen cuando se generan señales de corriente o tensión con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico (60 Hz o 50 Hz). Estos armónicos pueden extenderse hasta el primer centenar y representar hasta un 20 % del valor eficaz de la tensión.

Estas perturbaciones son provocadas por cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico. Este asunto es crucial en la industria debido al potencial de causar daños significativos a los equipos eléctricos. Los efectos más comunes incluyen vibraciones, aumento de pérdidas en equipos rotativos, degradación de condensadores y activación inesperada de dispositivos de protección como interruptores.

Figura 9
Generación de armónico en el sistema eléctrico



Nota: (García, 2020)

Capítulo 2

Estudio Comparativo de lámparas

En este capítulo se realizará un estudio comparativo entre las lámparas de mercurio de alta presión HPL-N 125W y las lámparas LEDBright 20W, con un enfoque en el análisis lumínico y la calidad de energía. Las lámparas de mercurio de alta presión ya estaban instaladas en el circuito de iluminación, mientras que las lámparas LEDBright 20W fueron suministradas por el equipo de mantenimiento de la Universidad de Piura para su evaluación. Este análisis busca identificar las diferencias clave entre ambas tecnologías y determinar su idoneidad en diversas aplicaciones, resaltando los aspectos más relevantes de cada opción.

El circuito del sistema de iluminación de la vía peatonal tramo: Exterior edificio 80 - edificio de gobierno, presenta como sistema de red eléctrica fase dividida de un sistema trifásico 380V+N+T conectado a las líneas L1 L2 y neutro. Además, presenta el circuito del sistema de iluminación presenta interruptor horario analógico, encendiendo las lámparas desde las 18:30 horas hasta las 06:10 horas.

2.1 Caracterización de Lámparas

Para la caracterización de la lámpara mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 y LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR, el proceso incluye la recopilación de información detallada proporcionada por los fabricantes en las fichas técnicas y la realización de ensayos en laboratorio.

2.1.1 Caracterización de lámparas según ficha técnica

Se tienen los siguientes parámetros lumínicos y eléctricos según la ficha técnica del fabricante para cada una de las lámparas:

Caracterización de Lámpara **HPL-N 125W/542 E27**

- Especificaciones Técnicas
 - ✓ Tipo de Lámpara: HPL-N
 - ✓ Potencia (W): 125 W
 - ✓ Voltaje (V): Nominal 220 V, mínimo 202 V, máximo 237 V
 - ✓ Flujo Luminoso (lm): 6200 lm
 - ✓ Eficacia Luminosa (lm/W): 50 lm/W
 - ✓ Temperatura de Color (K): 4100 K
 - ✓ Índice de Reproducción Cromática (CRI): 46
- Distribución de Luz
 - ✓ Curva Fotométrica: No especificado

- ✓ Ángulo de Apertura: No especificado
- Características Físicas
 - ✓ Dimensiones: Diámetro máximo 76 mm, longitud máxima 173 mm
 - ✓ Peso: 63 g
 - ✓ Materiales: Vidrio blando
 - ✓ Acabado: Recubierto
- Instalación y Montaje
 - ✓ Tipo de Montaje: Base E27
 - ✓ Facilidad de Instalación: Universal
- Eficiencia Energética y Vida Útil
 - ✓ Vida Útil (horas):
 - Vida útil hasta el 5% de fallos: 6000 h
 - Vida útil hasta el 20% de fallos: 12000 h
 - Vida útil hasta el 50% de fallos: 20000 h
- Regulaciones y Certificaciones
 - ✓ Certificaciones de Seguridad: No especificado
 - ✓ Normativas de Eficiencia Energética: No especificado
- Características Adicionales
 - ✓ Regulabilidad: No regulable
 - ✓ Compatibilidad con Sistemas de Control: No especificado
 - ✓ Protección IP: No especificado
- Aplicaciones y Usos Recomendados
 - ✓ Uso Interior o Exterior: No especificado
 - ✓ Aplicaciones Específicas: No especificado
- Datos Adicionales
 - ✓ Contenido de Mercurio: 19 mg
 - ✓ Consumo de Energía: 137 kWh/1000h
 - ✓ Temperatura Máxima del Bulbo: 350 °C
 - ✓ Temperatura Máxima de la Base: 200 °C (392 °F)

- Código de Producto
 - ✓ Código Completo de Producto: 692059027779500
 - ✓ Nombre del Producto: HPL-N 125W/542 E27 1CT/24
 - ✓ EAN/UPC: 6920590277795
 - ✓ Código de Pedido: 928052007391
 - ✓ Cantidad por Paquete: 1
 - ✓ Cantidad de Paquetes por Caja: 24
 - ✓ Número de Material (12NC): 928052007391
 - ✓ Código ILCOS: QE-125/41/3-H-E27
- Diagramas y Datos Fotométricos
 - ✓ Curva de Distribución Espectral de Potencia: No especificado
 - ✓ Diagrama de Mantenimiento de Lúmenes:
 - Mantenimiento de lúmenes a 2000 h: 92%
 - Mantenimiento de lúmenes a 4000 h: 91%
 - Mantenimiento de lúmenes a 6000 h: 89%
 - Mantenimiento de lúmenes a 8000 h: 88%
 - Mantenimiento de lúmenes a 12000 h: 85%
 - Mantenimiento de lúmenes a 16000 h: 80%
 - Mantenimiento de lúmenes a 20000 h: 76%

Figura 10

Lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24



Nota: (Products Philips, 2017).

Caracterización de Lámpara LEDBright **20W E27 6500K HV 1PF/12 AR**

- Especificaciones Técnicas
 - ✓ Tipo de Lámpara: LEDBright
 - ✓ Potencia (W): 20 W
 - ✓ Voltaje (V): 220-240 V (nominal)
 - ✓ Flujo Luminoso (lm): 2350 lm
 - ✓ Eficacia Luminosa (lm/W): 117 lm/W
 - ✓ Temperatura de Color (K): 6500 K
 - ✓ Índice de Reproducción Cromática (CRI): 80
- Distribución de Luz
 - ✓ Ángulo de Haz (nominal): 150°
 - ✓ Consistencia de Color: < 6
 - ✓ LLMF al Final de la Vida Útil Nominal: 70%
- Características Físicas
 - ✓ Dimensiones:
 - Diámetro (D): 70 mm
 - Longitud (C): 125.7 mm
 - ✓ Peso: 0.066 kg
 - ✓ Forma del Foco: T70
 - ✓ Acabado: Blanco
- Instalación y Montaje
 - ✓ Tipo de Montaje: Base E27
 - ✓ Facilidad de Instalación: Universal
- Eficiencia Energética y Vida Útil
 - ✓ Vida Útil Nominal: 9000 horas
 - ✓ Ciclo del Interruptor: 50000
 - ✓ Consumo de Energía: 20 W
 - ✓ Corriente de la Lámpara: 170 mA
 - ✓ Equivalente en Potencia en Vatios: 145 W

- Operación y Aspectos Eléctricos
 - ✓ Frecuencia de Línea: 50-60 Hz
 - ✓ Frecuencia de Entrada: 50-60 Hz
 - ✓ Tiempo de Inicio (nominal): 0.5 s
 - ✓ Tiempo de Calentamiento hasta un 60% de Luz: 0.5 s
 - ✓ Factor de Potencia: 0.5
- Temperatura
 - ✓ Rango de Temperatura Ambiente: -20 °C a 45 °C
 - ✓ Temperatura Máxima del Estuche (nominal): 85 °C
- Controles y Atenuación
 - ✓ Regulable: No
- Aprobación y Aplicación
 - ✓ Cumple con el Reglamento RoHS de la UE: Sí
- Datos del Producto
 - ✓ Nombre del Producto del Pedido: LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR
 - ✓ Nombre Completo del Producto: LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR
 - ✓ Código del Pedido: 929002433711
 - ✓ N.º de Material (12NC): 929002433711
 - ✓ Numerador SAP: Cantidad por Paquete: 1
 - ✓ EAN/UPC: Producto/Caja: 8719514396104
 - ✓ Numerador: Paquetes por Caja Externa: 12
 - ✓ EAN/UPC - Caja: 8719514396111
- Diagramas y Datos Fotométricos
 - ✓ Diagrama de Distribución de Luz: No especificado en el documento
 - ✓ Distribución Espectral de Potencia: No especificado en el documento

Figura 11

Lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR



Nota: (Products Philips, 2017)

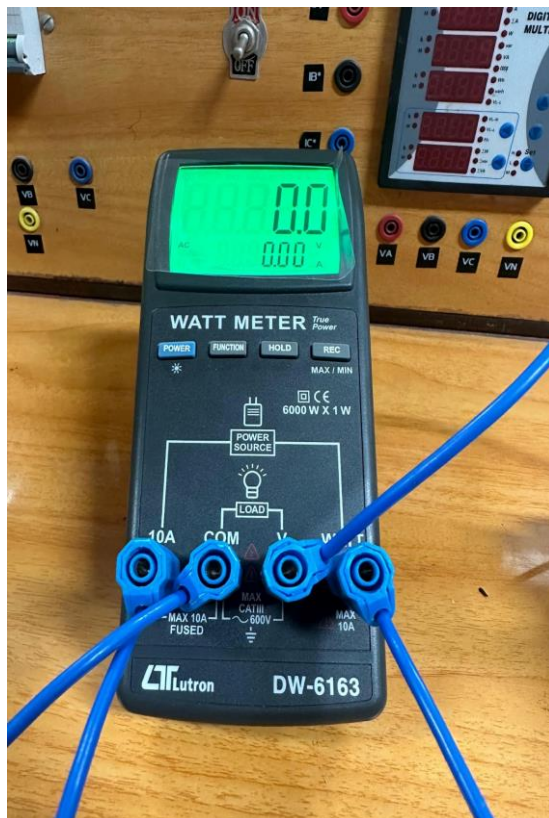
2.1.2 Caracterización de lámparas mediante ensayos en laboratorio

Para la caracterización individual de cada lámpara, se han usado los siguientes equipos de medición en laboratorio de electrotecnia campus Piura, con el fin de obtener valores y comparar valores nominales como potencia, amperaje y factor de potencia.

Vatímetro digital “**LUTRON DW6163**”:

- Medición de potencia real
- TRMS AC V 0 - 600 V AC
- TRMS AC A 0 -10 A AC
- WATT 0 a 6000 W, 1 W Resolución
- Factor de potencia 0,01 a 1,00
- AC V/AC A respuesta de frecuencia 40 a 400 Hz
- Pantalla LCD grande, pantalla doble, retroiluminación
- Máx. Indicación 9999
- Indicación de sobre-entrada
- Cero ajustes automáticos
- Retención de datos
- Recuperación de memoria valor máximo y mínimo

Figura 12
 Vatímetro Digital "LUTRON DW6163"



Multímetro digital **TRUE RMS UNI-T UT89X:**

- Voltaje DC: Rango de 600 mV a 1000 V con una precisión de $\pm(0.5\%+2)$.
- Voltaje AC: Rango de 6 V a 1000 V con una precisión de $\pm(0.8\%+5)$.
- Corriente DC: Rango de 60 μ A a 20 A con una precisión de $\pm(0.8\%+8)$.
- Corriente AC: Rango de 60 mA a 20 A con una precisión de $\pm(1\%+12)$.
- Resistencia: Rango de 600 Ω a 60 M Ω con una precisión de $\pm(0.8\%+3)$.
- Capacitancia: Rango de 6 nF a 100 mF con una precisión de $\pm(2.5\%+20)$.
- Frecuencia: Rango de 9.999 Hz a 9.999 MHz con una precisión de $\pm(0.1\%+4)$.
- Ciclo de trabajo: 0.1%~99.9% con una precisión de $\pm(2\%+5)$.
- Temperatura: Rango de -40°C a 1000°C (o -40°F a 1832°F) con una precisión de $\pm(2\%+4$ para °C) y $\pm(2\%+8$ para °F).

Frecuencias de Medición:

- Voltaje AC: 45~1000 Hz.
- Corriente AC: 45~1000 Hz.

Figura 13

Multímetro digital "UNI-T UT89X"



Vatímetro digital "LUTRON DW6163":

- Voltaje de Ingreso: 220V AC o 380V AC.
- Voltaje de Salida: Ajustable entre 0V y 300V AC o 0V y 500V AC.
- Potencia: 3 KVA.
- Fase: Trifásico (3PH).
- Frecuencia: 50-60 Hz.
- Factor de Potencia: 0.9.
- Tipos de Cargas Soportadas: Inductiva o capacitiva.
- Conectores de Entrada/Salida: Bornera.
- Indicador de Voltaje: Voltímetro digital.
- Eficiencia: $\geq 98\%$.
- Distorsión de Onda: Nula.
- Distorsión Armónica: $<3\%$.
- Tipo: Auto-transformador en seco.
- Norma de Fabricación: IEC – 76 ITINTEC 370 – 002.

Figura 14

Variac Trifasico de "3kVA ENERGIT EN-TSGC3K"



A continuación, en las Figura 15. se presenta el esquema de conexión que se ha utilizado durante los ensayos en laboratorio. Este esquema es fundamental para comprender la configuración empleada para medir los parámetros eléctricos de las lámparas bajo estudio. La correcta conexión de estos componentes es crucial para asegurar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos durante las pruebas.

Figura 15

Esquema de conexión de circuito - lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24

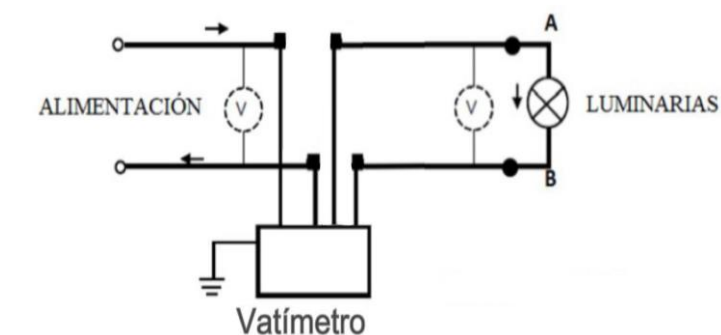


Figura 16

Esquema de conexión de circuito - lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24

**Figura 17**

Esquema de conexión de circuito - lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR



De acuerdo con el esquema de conexión del circuito en Figura 15 con la lámpara de mercurio de alta presión estándar y lámpara LED se realizó la conexión según la Figura 16 y Figura 17, se conectó el transformador variable (variac trifásico) de 3kVA ENERGIT EN-TSGC3K como fuente de alimentación para mantener el nivel de tensión constante (sin variaciones), a un nivel de tensión 220.6 VAC. Así mismo, se conectó el vatímetro Digital LUTRON DW6163 en paralelo a la salida del variac, con el fin de obtener mediciones como: potencia, factor de potencia, amperaje y nivel de tensión; parámetros importantes para el estudio de la caracterización individual de lámparas.

Se obtuvieron los siguientes resultados según las mediciones obtenidas de los equipos de medición en laboratorio de electrotécnica de la Universidad de Piura:

Tabla 1

Parámetros eléctricos obtenidos en laboratorio electrotecnia - lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24

Parámetro eléctrico	Valor
Potencia activa (P)	134.0 [W]
Factor de potencia (FP)	0.94 [-]
Voltaje (V)	220.6 [V]
Corriente (I)	0.65 [A]

Tabla 2

Parámetros eléctricos obtenidos en laboratorio electrotecnia - lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR

Parámetro eléctrico	Valor
Potencia activa (P)	16.0 [W]
Factor de potencia (FP)	0.50 [-]
Voltaje (V)	220.6 [V]
Corriente (I)	0.14 [A]

2.2 Análisis de Circuito de Iluminación.

2.2.1 Descripción del sistema de iluminación peatonal

El circuito de iluminación peatonal como caso de estudio, tiene de recorrido desde el edificio 80 hacia el edificio de gobierno en el Campus Piura de la Universidad de Piura. Esta área de estudio se representa en la Figura 18.

Figura 18

Plano de recorrido de luminarias del circuito de iluminación de la Universidad de Piura



Asimismo, consta de 28 lámparas de mercurio de alta presión, cuya acometida es un circuito 3P+N+T cable NH-80 4mm² INDECO. El circuito de iluminación a estudiar pertenece al tablero de aire acondicionado y sistema de iluminación - exterior edificio 80, el cual se visualiza en la Figura 19.

Figura 19

Tablero de aire acondicionado y sistema de iluminación - exterior Edificio 80

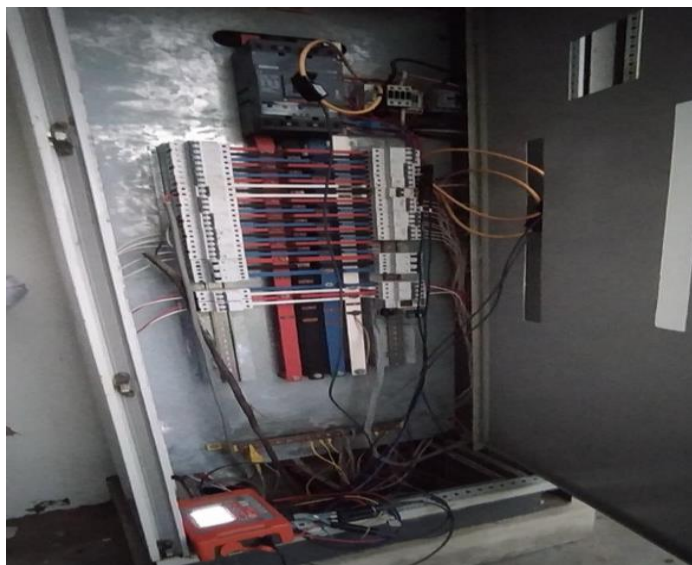
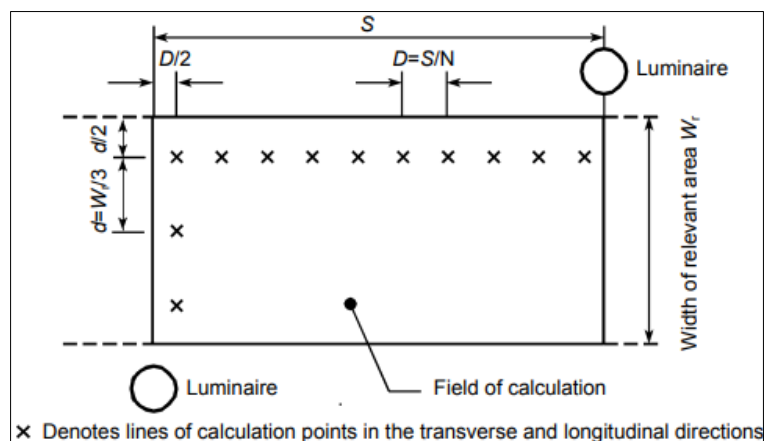


Figura 21

Puntos de cálculos de iluminancia



Nota: (CIE 140 -2000)

Se presenta la Tabla 3. de especificaciones del luxómetro utilizado para las mediciones en campo en el análisis lumínico de sistemas de iluminación con lámparas LED y vapor de mercurio de alta presión.

Tabla 3*Especificaciones técnicas de luxómetro empleado para mediciones en campo*

Gama	20 lux, 200 lux, 2000 lux, 20k lux 20 fc, 200 fc, 2000 fc, 20k fc
Resolución	0,01 lux, 0,01 fc
Precisión	
Tipo A 2856 Fuente de luz	$\pm 5\%$ de la lectura ± 10 cts
Fuente de luz común	$\pm 18\%$ de la lectura ± 2 cts
Sensor	Fotodiodo de silicio
Respuesta espectral	Curva fotópica CIE
Frecuencia de muestreo	2,5 veces por segundo, nominal
Función MAX	Sí
Monitor	LCD retroiluminada de 31/2 dígitos, 2000 unidades
Fuente de alimentación	Pila alcalina de 9 V (incluida)
Duración de la batería	200 horas
Indicación de batería baja	Sí
Dimensiones	6,81 x 2,38 x 1,5" (173 x 60,5 x 38 mm)
Peso	Aproximadamente 7,55 oz (214 g), incluida la batería
Temperatura de funcionamiento	De 0 a 50 °C (de 32 a 122 °F)
Temperatura de almacenamiento	-4 a 140 °F (-20 °C a 60 °C)
Cumplimiento de la seguridad	EN 61010-1 (1995-A2)
Grado de contaminación	2
Clasificación de seguridad	24V CAT III

Nota: (AEMC, 2024)

Figura 22
Luxómetro AEMC CA811



Nota: (AEMC, 2024)

Los criterios que se deben tener en cuenta para asignar una clasificación de iluminación están asociados a las funciones y características de la vía, los tipos de alumbrado se determinan de acuerdo al tipo de vía, bajo el criterio funcional conforme la Tabla 1 de la Norma técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución” Para las vías que son exclusivamente peatonales, se debe considerar un nivel medio de iluminancia correspondiente al tipo de alumbrado V.

Tabla 4
Tipos de alumbrado según la clasificación vial

Tipo de vía	Tipo de alumbrado	Función	Características del tránsito y la vía
Vías peatonales	V	Permite el acceso a las viviendas y propiedades mediante el tráfico peatonal	- Tráfico exclusivamente peatonal.

Nota: Extracto de la Tabla 1 de la Norma técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución”

Los parámetros luminotécnicos nominales para las vías peatonales, tales como: luminancia, iluminancia, uniformidad media de iluminancia y los índices de control de deslumbramiento se indican en la Tabla 5 y Tabla 6, teniendo en cuenta para el caso aplicativo el tipo de calza clara.

Tabla 5*Niveles de luminancia, iluminancia e índice de control de deslumbramiento*

Tipo de alumbrado	Luminancia media revestimiento seco	Iluminancia media (lux)		Índice de control de deslumbramiento
	(cd/m2)	Calzada clara	Calzada oscura	(G)
V		1 – 3	2 – 6	4 - 5

Nota: Extracto de la Tabla 2 de la Norma técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución”

Tabla 6*Uniformidad media de iluminancia*

Tipo de Alumbrado	Uniformidad media
IV , V	>0,15

Nota: Extracto de la Tabla 4 de la Norma técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución”

El análisis lumínico en campo de sistemas de iluminación con lámparas LED y lámparas de mercurio de alta presión estándar HPL-N es crucial para evaluar su desempeño real en diversas aplicaciones prácticas. Las mediciones en campo permiten obtener datos precisos sobre la eficiencia energética, la calidad de la luz y la distribución lumínica en entornos reales, lo que es esencial para validar los beneficios teóricos de las lámparas LED y garantizar un rendimiento óptimo.

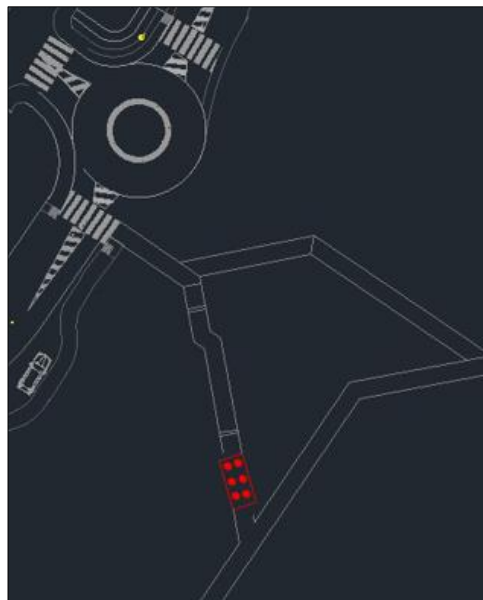
Para el análisis de iluminación de lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR, se procedió a realizar la medición y obtención de datos del área de cálculo seleccionado. Se seleccionó la superficie de cálculo ubicado en el tramo de vía peatonal entre edificio de gobierno, educación y edificio 80 señalado en la Figura 23.

Figura 23

Tramo de vía peatonal entre edificio de gobierno, humanidades y edificio 80

**Figura 24**

Ubicación y distribución de puntos para análisis lumínico lámpara LED



Se puede apreciar en la Figura 24. la distribución de los puntos. Así mismo, se obtienen los siguientes niveles de iluminancia:

Tabla 6

Resumen de resultados de mediciones de iluminancia de LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR . Unidades (Lux).

m	0.80	1.60	2.40	3.20	4.00	4.80	5.60	6.40	7.20
0.20	4.90	7.30	11.10	15.0	16.40	15.30	11.50	7.70	5.10
1.00	4.50	6.40	9.20	12.1	13.40	12.40	9.60	6.50	4.60
1.80	3.60	5.10	6.90	8.60	9.30	8.50	7.10	5.10	3.90

De acuerdo con los resultados de mediciones de iluminancia mostrados en la Tabla., se obtienen los siguientes parámetros.

$$E_{min} = 3.6 \text{ [lx]}$$

$$E_{prom} = 8.559 \text{ [lx]}$$

Uniformidad media de iluminancia:

$$U_o = E_{min}/E_{prom}$$

$$U_o = 3.6/8.559$$

$$U_o (G1) = 0.42$$

Se obtuvieron niveles de iluminancia media (lux) superior a lo normado según la Norma técnica DGE "Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución indicado en la Tabla 6.

De la misma manera, para el análisis de iluminación de lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24, se procedió a realizar la medición y obtención de datos del área de cálculo seleccionado. Se seleccionó la superficie de cálculo ubicado en el tramo de vía peatonal entre ermita y edificio 80 según Figura 25.

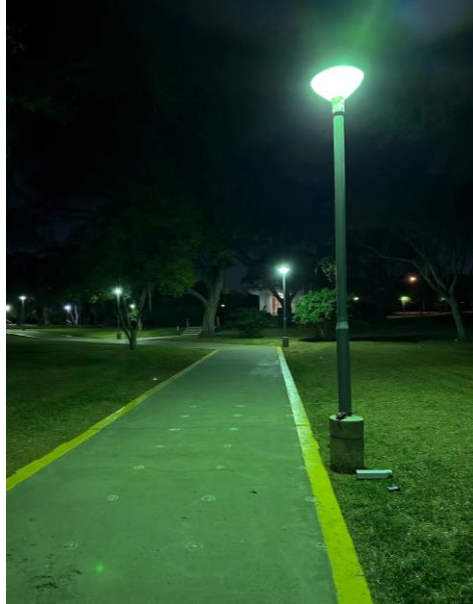
Figura 25

Plano de recorrido de luminarias el circuito de iluminación de la Universidad de Piura.



Figura 26

Ubicación y distribución de puntos para análisis lumínico de lámpara de mercurio



Se puede apreciar en la figura 26. la distribución de los puntos. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 7

Resumen de resultados de mediciones de iluminancia de lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24. Unidades (Lux).

m	0.80	1.60	2.40	3.20	4.00	4.80	5.60	6.40	7.20
0.20	12.10	15.60	18.20	19.40	20.2	18.90	17.60	14.60	11.30
1.00	11.0	13.80	16.10	17.30	18.30	17.10	16.10	13.40	10.50
1.80	9.30	11.80	13.70	15.10	15.60	14.70	13.30	11.30	9.10

De acuerdo con los resultados de mediciones de iluminancia mostrados en la Tabla 7., se obtienen los siguientes parámetros.

$$E_{min} = 9.1 \text{ [lx]}$$

$$E_{prom} = 14.64 \text{ [lx]}$$

Uniformidad media de iluminancia:

$$U_o = E_{min}/E_{prom}$$

$$U_o = 9.1/14.64$$

$$U_o (G1) = 0.621$$

Se obtuvieron niveles de iluminancia media (lux) superior a lo normado según la Norma técnica DGE “Alumbrado de vías públicas en zonas de concesión de distribución indicado en la Tabla 5.

2.2.3 Análisis de calidad de energía

La calidad de la energía se refiere a una serie de características del suministro eléctrico, incluyendo la estabilidad de la tensión, la frecuencia, la presencia de armónicos, las fluctuaciones de voltaje y las interrupciones momentáneas. Estas perturbaciones pueden causar desde fallos en equipos electrónicos y pérdidas en la producción industrial, hasta riesgos para la seguridad en entornos críticos como hospitales y centros de datos.

El análisis de calidad de energía se convierte, por tanto, en una herramienta indispensable para identificar, evaluar y mitigar los problemas asociados con las perturbaciones eléctricas. A través del uso de equipos de medición avanzados y técnicas analíticas, es posible monitorear y diagnosticar las anomalías en el suministro eléctrico, permitiendo la implementación de soluciones correctivas y preventivas.

Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos (NTCSE), el propósito de esta Norma es definir los niveles mínimos de calidad para los servicios eléctricos, incluyendo el alumbrado público, así como las responsabilidades de las empresas eléctricas y los clientes que operan bajo el régimen de la Ley de Concesiones Eléctricas, Decreto Ley N° 25844.

En esta sección, se aborda el análisis de calidad de energía en el contexto del sistema de iluminación utilizando los dos tipos de lámparas: LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR y lámpara de mercurio de alta presión HPL-N125W. Verificando si los parámetros están dentro de lo normado de: perturbaciones por armónicos de la red eléctrica, perteneciente al circuito de iluminación. Basándose en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos “NTCSE” y norma internacional como la IEEE.

2.2.3.1 Características de analizador de redes. El equipo de medición utilizado es un analizador de redes portátil marca Sonel, modelo PQM 702 Serie AZ1049.

El analizador de calidad de energía eléctrica PQM-702, es un dispositivo avanzado y diseñado para la medición, análisis y registro de parámetros de redes eléctricas de 50/60 Hz y la calidad de la energía según la normativa europea EN 50160. Estos analizadores cumplen plenamente con los requisitos de la norma IEC 61000-4-30:2015 clase A. El analizador cuenta con cinco entradas de medición de tensión con cables terminados en conectores tipo banana, identificados como L1, L2, L3, N y PE. Los cuatro canales de medición pueden registrar tensiones de hasta 760 VRMS o 1000 VRMS en relación con el suelo, según la versión. Este rango se puede ampliar utilizando transductores de tensión externos adicionales. Así mismo, la corriente se mide a través de cuatro entradas de corriente conectadas a cables cortos terminados en enchufes para pinzas. A estas entradas se pueden conectar las pinzas flexibles F-1(A), F-2(A), F-3(A) con un rango nominal de 3000 A.

Figura 27

Analizador de redes Sonel PQM 702



El analizador Sonel PQM 702 permite medir y registrar los siguientes parámetros:

- Tensiones eficaces de fase y entre fases en el rango hasta 760 V o 1000 V dependiendo de la versión (pico hasta ± 1500 V)
- Transitorios de tensión (sobretensiones) en el rango de hasta ± 8 kV
- Corrientes eficaces
- Factores de cresta de corriente y tensión
- Frecuencia de red en el rango de 40..70 Hz,
- Potencias y energías activas, reactivas, aparentes
- Potencia de distorsión.
- Componentes armónicas de tensiones y corrientes (hasta orden 50^a),
- Factor de distorsión armónica THDF y THDR para corriente y tensión
- Factor de distorsión TDD
- Factor de pérdidas K causadas por armónicos más altos (K-Factor)
- Potencias activas y reactivas de armónicos
- Ángulos entre los armónicos de tensión y corriente
- Factor de potencia, $\cos\phi$, $\tan\phi$.
- Factores de desequilibrio de redes trifásicas y componentes simétricas
- Indicadores de parpadeo de luz Pst y Plt
- Componentes interarmónicas de tensiones y corrientes (hasta 50^a)
- Factor de distorsión interarmónica TIDF y TIDR para corriente y tensión
- Señales de control de tensión en el rango de frecuencia de 5...3000 Hz
- Cambios rápidos de tensión (RVC).

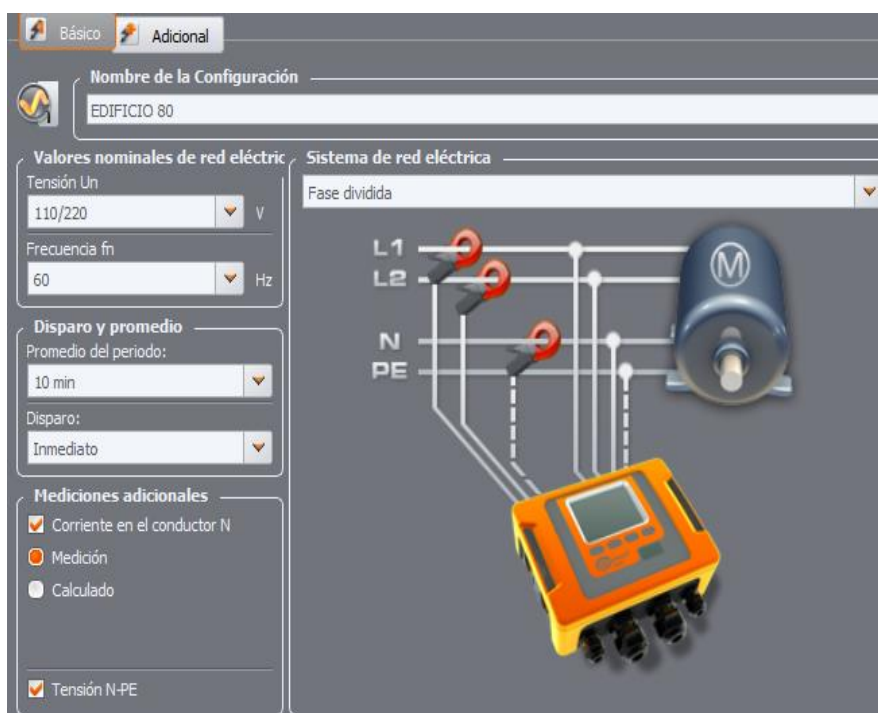
2.2.3.2 Instalación de analizador de redes Sonel PQM 702. Para la instalación del analizador de redes se han tenido en cuenta los riesgos y peligros antes de realizar la conexión, para ello se utilizaron los EPPs necesarios para trabajos eléctricos:

- Zapatos dieléctrico certificados
- Guantes dieléctricos clase 0 1000V
- Ropa algodón
- Lentes de seguridad
- Elaboración de análisis de trabajo seguro (ATS) para identificación de riesgos y peligros para trabajos en caliente.

Se estableció la configuración de sistema de red eléctrica: sistema de red eléctrica fase dividida de un sistema trifásico 380VAC+N+T conectado a las líneas L1 y L2.

Figura 28

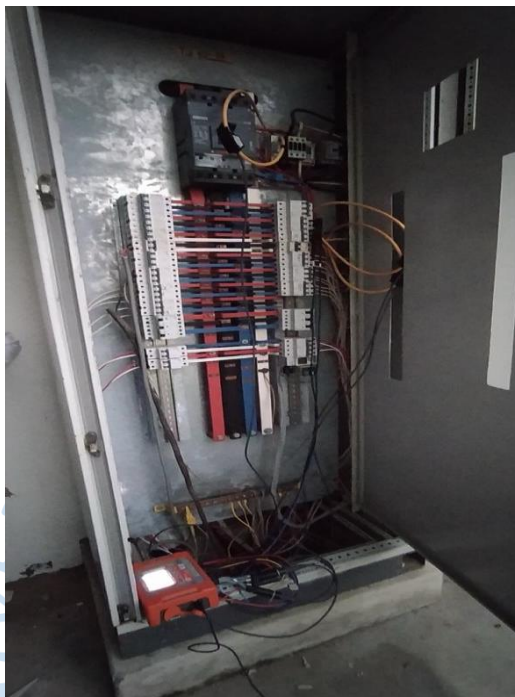
Selección de conexión para configuración de analizador de redes Sonel PQM 702



Se conectaron las pinzas de tensión y de corriente a la salida del interruptor termomagnético del circuito de iluminación. Ver Figura 29.

Figura 29

Instalación de analizador de redes Sonel PQM 702 en tablero aire acondicionado y sistema de iluminación - exterior edificio 80.



Lugar: Tablero aire acondicionado y sistema de iluminación - exterior edificio 80.

Voltaje: 380V 3P+N+T.

Tiempo de Integración: el tiempo de integración es de 10 minutos.

Periodo de medición: 03 días 13 hrs.

2.2.3.3 Resultados y análisis de circuito de iluminación lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR. Al ser un circuito de iluminación con mando de interruptor horario, el cual da apertura y cierre del circuito, la carga se mantiene constante durante el periodo de medición. Siendo viernes 26 de abril de 2023 a las 18:27:54 hrs, se ha iniciado el registro de parámetros eléctricos por un periodo de 3 días y 13 hrs, retirando el equipo el martes 30 de abril de 2023 a las 07:27:54 hrs. Durante la medición, los valores instantáneos de los parámetros han sido medidos y promediados en intervalos de 10 minutos. El analizador de redes ha sido instalado en: ITM Sistema de iluminación exterior Edificio 80; de tal manera se registren mediciones, y eventos de circuito de iluminación.

- Análisis de Tensión

De acuerdo con la Norma Técnica de Calidad de los Servicio Eléctricos (NTCSE) Las tolerancias permitidas sobre las tensiones nominales en los puntos de entrega de energía, para todas las etapas y niveles de tensión, son de hasta $\pm 5.0\%$ respecto a las tensiones

nominales de dichos puntos. En el caso de las redes secundarias en servicios clasificados como urbano-rurales y/o rurales, estas tolerancias son de hasta $\pm 7.5\%$. La energía eléctrica se considera de mala calidad si la tensión se encuentra fuera del rango de tolerancias establecido por un tiempo superior al cinco por ciento (5%) del período de medición, de acuerdo con la norma NTCSE. Así mismo, en la Tabla 8. se indican los valores a tener en cuenta para el criterio de evaluación de desbalance de tensión según la norma IEC 61000-4-30.

Tabla 8

Desbalance máximo permitido en la tensión en el punto de acometida

Tensión kV	Desbalance %
Menor de 1	3
Mayor o igual de 1	2

Nota: IEC 61000-4-30.

Tabla 9

Evaluación de calidad de tensión y desbalance de tensión lámpara led

Tensión Nominal	220 V		
Combinación de fases	L 1	L 2	L 3
Muestras analizadas	509	509	509
Muestras fuera de rango (Sobretensiones)	0	0	0
% de muestras fuera de rango (Sobretensiones)	0.00 %	0.00%	0.00%
Número de muestras con desbalance	0		

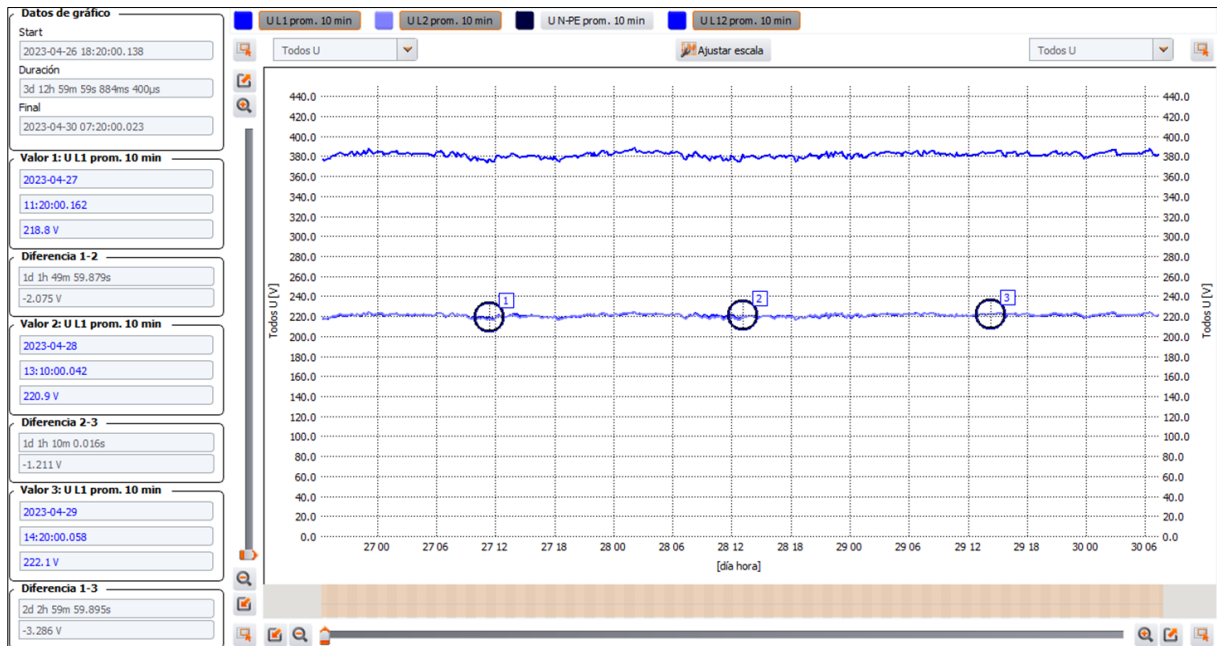
De acuerdo con las tolerancias admitidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicio Eléctricos (NTCSE), estableciendo un límite de $\pm 5\%V_n$. Se obtienen la tensión teórica mínima y máxima de 209.0 V y 231.0 teniendo como voltaje nominal 220VAC. Por lo tanto, al ser cargas de bajo consumo el circuito de iluminación utilizando las lámparas LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR, se obtuvieron niveles de tensión mínima y máxima de 215.99V y 224.28 V respectivamente. Se cumplen los niveles de sobretensiones y subtensiones al conectar las cargas.

Tabla 10*Mediciones de nivel de tensión tiempo de integración 10 minutos lámpara led.*

Fecha	Tiempo (UTC-5)	U L1 prom. 10 min [V]	U L2 prom. 10 min [V]	V máx	V mín	Desbalance
26/04/2023	18:40:00	216.88	217.52	217.52	216.88	0.44
26/04/2023	18:50:00	217.06	217.74	217.74	217.06	0.47
26/04/2023	19:00:00	217.4	218.09	218.09	217.4	0.48
26/04/2023	19:10:00	217.97	218.53	218.53	217.97	0.38
26/04/2023	19:20:00	218.9	219.53	219.53	218.9	0.43
27/04/2023	18:40:00	217.91	217.28	217.91	217.28	0.43
27/04/2023	18:50:00	217.92	217.39	217.92	217.39	0.37
27/04/2023	19:00:00	218.46	218.41	218.46	218.41	0.03
27/04/2023	19:10:00	218.86	218.7	218.86	218.7	0.11
27/04/2023	19:20:00	219.04	219.27	219.27	219.04	0.16
28/04/2023	18:40:00	216.82	216.83	216.83	216.82	0.01
28/04/2023	18:50:00	218.69	219.13	219.13	218.69	0.30
28/04/2023	19:00:00	218.78	218.96	218.96	218.78	0.12
28/04/2023	19:10:00	218.34	218.36	218.36	218.34	0.01
28/04/2023	19:20:00	218.54	218.4	218.54	218.4	0.10

Figura 30

Nivel de tensión respecto al tiempo entre fases y respecto al neutro lámpara led.



De acuerdo con la figura 30. no hay variaciones del nivel de tensión que afecten al circuito de iluminación en el periodo de medición con un tiempo de integración de 10 minutos. Se cumplen los niveles de sobretensiones y subteniones al conectar las cargas.

- Análisis de THD de tensión:

En la evaluación de distorsión total de armónicos de tensión de los datos del periodo de medición, la carga conectada empleando lámparas LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR no generan tensiones armónicas, encontrando valores dentro de rango y cumpliendo según lo indicado por la NTCSE.

Tabla 11

Parámetros de distorsión armónica total según NTCSE

Orden de la armonica o THD	Para tensiones mayores a 60kV	Para tensiones menores iguales a 60kV
THD	3%	8%

Nota: NTCSE

Tabla 12*Distorsión armónica total tensión lámpara led THD v*

THD Tensión			
<i>Designación</i>	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>L3</i>
<i>Número de muestras</i>	509	509	509
<i>Muestras fuera de rango</i>	0	0	0
<i>% de muestras fuera de rango</i>	0.00%	0.00%	0.00%

Figura 31

Forma de onda de tensión a plena carga 2023-04-22 21:50:00.161 lámpara led

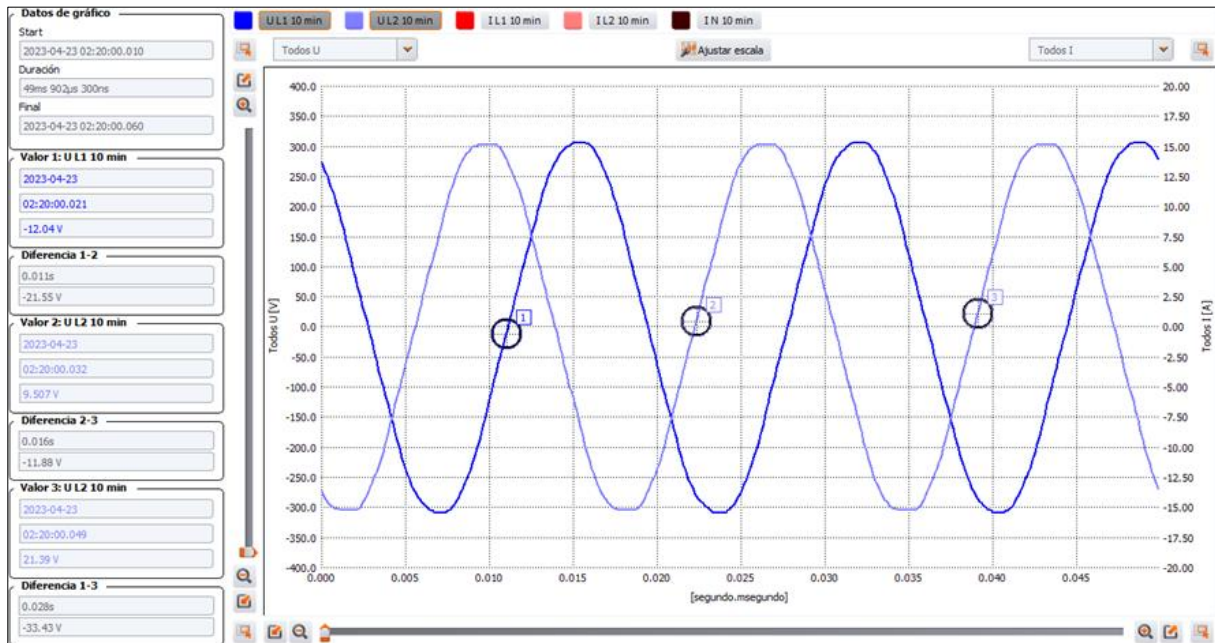


Figura 32

Forma de onda de tensión a media carga 2023-04-23 02:20:00.060 lámpara led

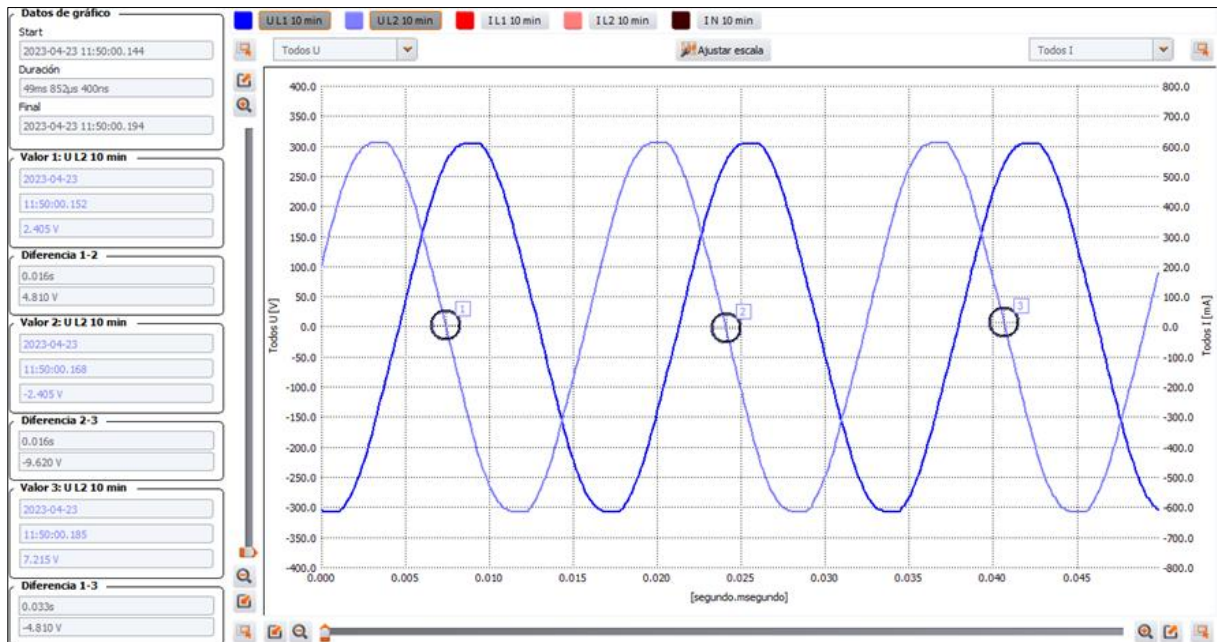


Figura 33

Forma de onda de tensión sin carga 2023-04-23 11:50:00.194 lámpara led

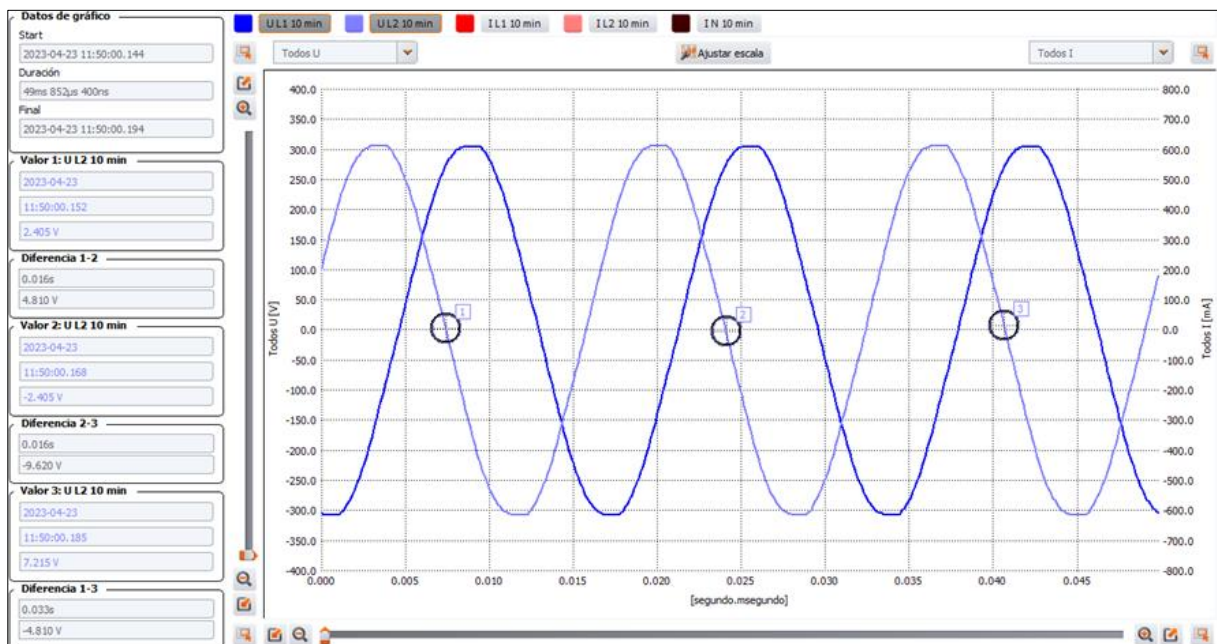
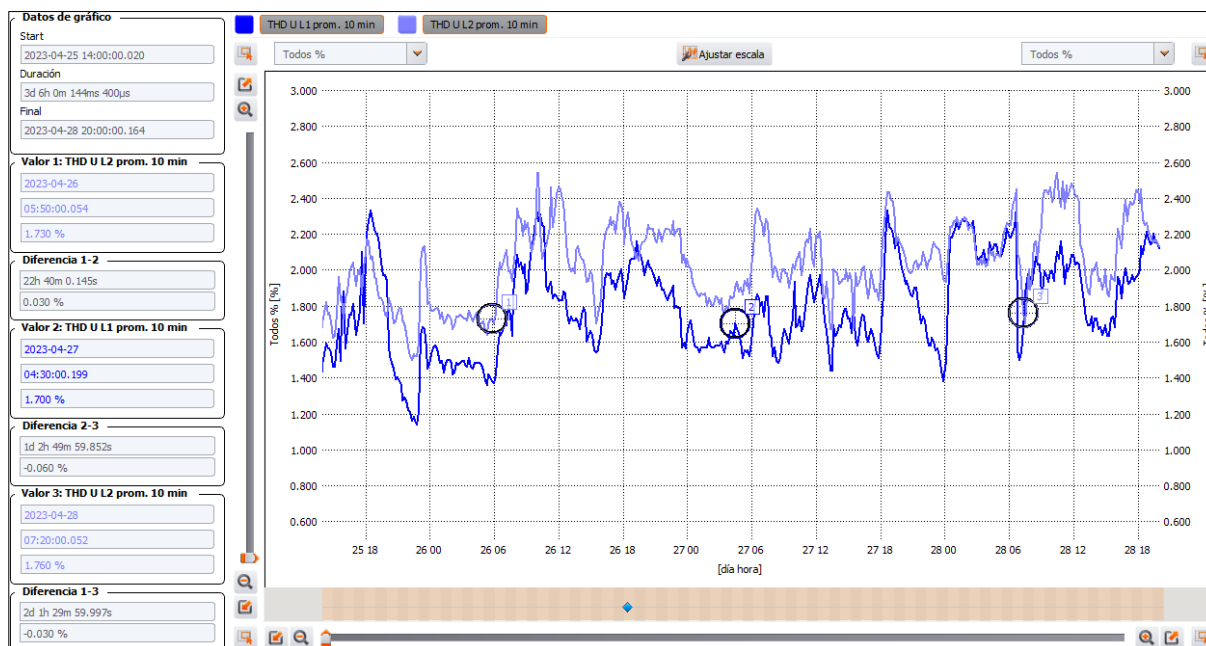


Figura 34

Variación de la distorsión armónica total THDv% lámpara led



La forma de onda de tensión se muestra uniforme cuando las luminarias están conectadas a plena, media y sin carga, ya que no hay trascendencia respecto a tensiones armónicas.

- Análisis de corriente:

De acuerdo a las mediciones de corriente obtenidas durante el tiempo de medición.

Tabla 13

Mediciones de corriente tiempo de integración 10 minutos lámpara led

Fecha	Tiempo (UTC-5)	I L1 prom. 10 min [A]	I L2 prom. 10 min [A]
26/04/2023	18:40:00	2.052	1.851
26/04/2023	18:50:00	2.036	1.857
26/04/2023	19:00:00	2.020	1.855
26/04/2023	19:10:00	2.006	1.864
26/04/2023	19:20:00	1.993	1.854
27/04/2023	18:40:00	2.049	1.877
27/04/2023	18:50:00	2.051	1.887
27/04/2023	19:00:00	2.037	1.885

27/04/2023	19:10:00	2.023	1.886
27/04/2023	19:20:00	2.018	1.895
28/04/2023	18:40:00	2.067	1.888
28/04/2023	18:50:00	2.050	1.867
28/04/2023	19:00:00	2.030	1.853
28/04/2023	19:10:00	2.020	1.858
28/04/2023	19:20:00	2.006	1.865

Figura 35

Nivel de corriente respecto al tiempo



En el circuito donde ha sido instalado el analizador de redes, al ser una carga fija de iluminación activadas mediante interruptor horario, se definen periodos de funcionamiento fijos, se obtuvieron niveles de corriente máxima de 2.159A. Se observa en la Figura 35. el nivel de corriente respecto al tiempo.

- Análisis de armónicos de corriente:

En la Figura 36, se puede observar que la forma de onda de corriente se ve distorsionada significativamente por la presencia de armónicos (cargas no lineales) en los parámetros de corriente.

Figura 36

Forma de onda de corriente a plena carga 2023-04-26 20:50:00.005 lámpara led

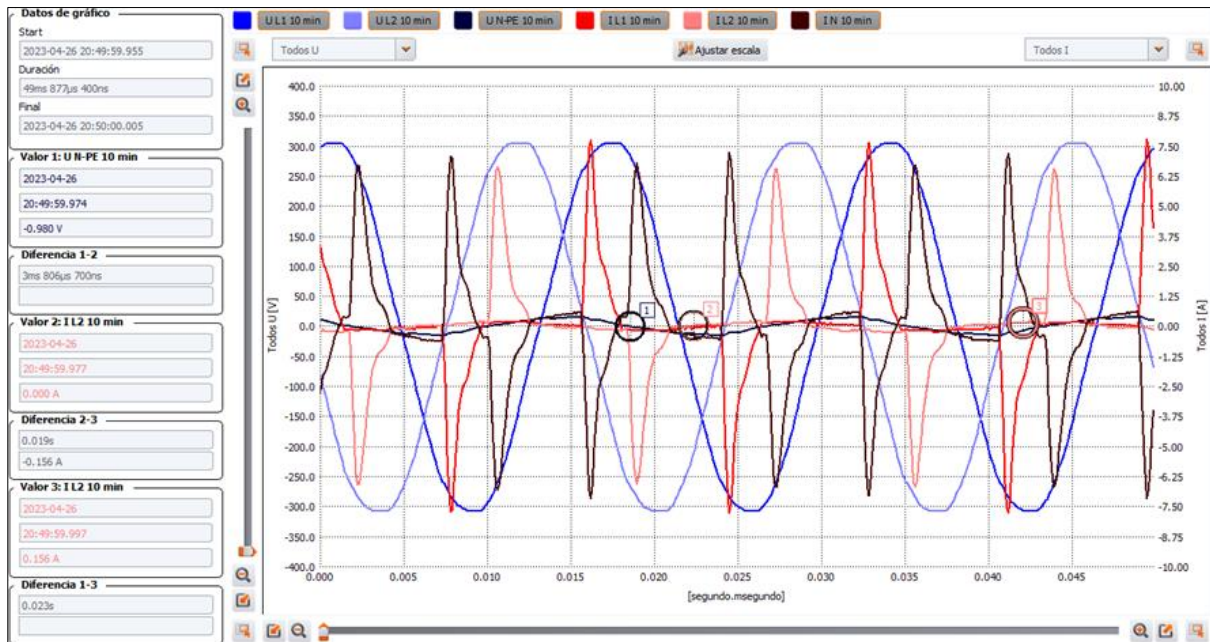
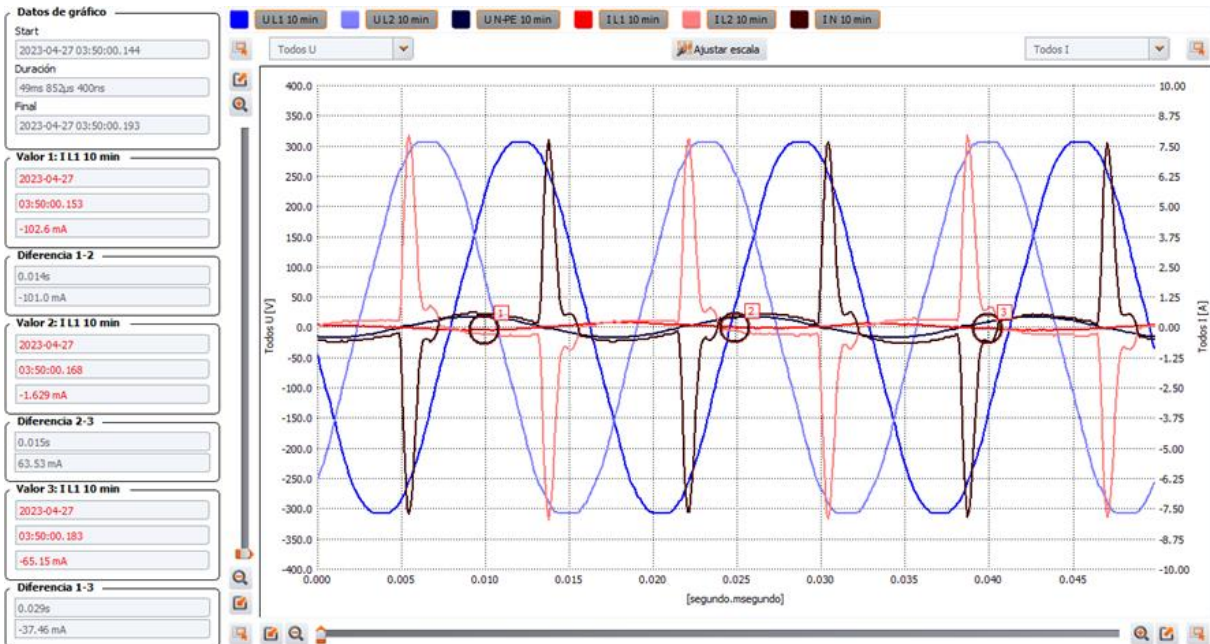


Figura 37

Forma de onda de corriente a media carga 2023-04-27 03:50:00.193 lámpara led.



No hay una norma peruana que regule armónicos de corrientes, no obstante, se menciona que el control de los armónicos se asume bajo la responsabilidad del propietario. Para este estudio se toma en cuenta la norma internacional IEEE 519, la cual establece un límite de 12% para armónicos de orden 3, 5 y 7; y un límite de 5.5% para armónicos de orden 11 y 13.

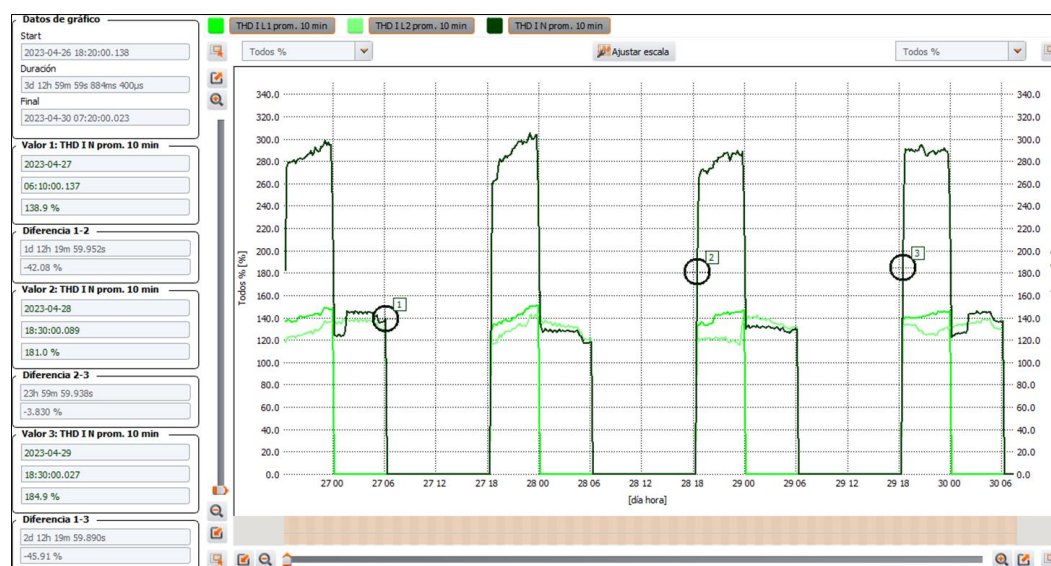
Tabla 14*Distorsión armónica de corriente THDi % lámpara led*

Fecha	Tiempo (UTC-5)	THD I L1 prom. 10 min [%]	THD I L2 prom. 10 min [%]
26/04/2023	18:40:00	137.05	120.29
26/04/2023	18:50:00	138.11	122.15
26/04/2023	19:00:00	137.14	122.33
26/04/2023	19:10:00	136.17	123.48
26/04/2023	19:20:00	135.81	123.18
27/04/2023	18:40:00	130.34	116.9
27/04/2023	18:50:00	134.17	116.51
27/04/2023	19:00:00	133.93	116.96
27/04/2023	19:10:00	133.5	117.94
27/04/2023	19:20:00	135.46	121.04
28/04/2023	18:40:00	133.49	120.82
28/04/2023	18:50:00	133.74	119.15
28/04/2023	19:00:00	136.08	121.09
28/04/2023	19:10:00	134.93	120.57
28/04/2023	19:20:00	133.56	120.92

Se obtuvieron mediciones de distorsión armónica de corriente THDi% por encima de lo recomendado y normado según la IEEE 519, obteniendo valores de hasta 151.7 THDi% según la figura. tasa de distorsión armónica de corriente respecto al tiempo.

Figura 38

Distorsión armónica de corriente THDi % respecto al tiempo lámpara led



Para un mejor análisis de armónicos de corriente, la normativa no emplea terminologías comunes utilizados en la IEC, por lo que en vez de utilizar distorsión armónica total (THD) se emplea la demanda de distorsión total (TDD), el cual se debe de obtener valores inferiores a 15 % establecido por la normativa IEEE 519.

Tabla 15

Demanda de distorsión total TDD % lámpara led

Fecha	Tiempo (UTC-5)	TDD L1 prom. 10 min [%]	TDD L2 prom. 10 min [%]
26/04/2023	18:40:00	119.59	102.65
26/04/2023	18:50:00	118.93	103.66
26/04/2023	19:00:00	117.75	103.66
26/04/2023	19:10:00	116.64	104.5
26/04/2023	19:20:00	115.78	103.8
27/04/2023	18:40:00	117.25	102.6
27/04/2023	18:50:00	118.58	103.27
27/04/2023	19:00:00	117.73	103.32
27/04/2023	19:10:00	116.77	103.76
27/04/2023	19:20:00	117.13	105.38

28/04/2023	18:40:00	119.36	104.87
28/04/2023	18:50:00	118.45	103.13
28/04/2023	19:00:00	118.0	103.05
28/04/2023	19:10:00	117.07	103.16
28/04/2023	19:20:00	115.83	103.66

Tabla 16
Evaluación de TDD lámpara led

TDD		
Designación	L1	L2
Número de muestras	509	509
Muestras fuera de rango	509	509
% de muestras fuera de rango	100.00%	100.00%

En la Figura 39. en donde se presenta la gráfica de demanda de distorsión armónica total TDD% respecto al tiempo, se encuentran valores de demanda de distorsión total de hasta 130.1% como máximo.

Figura 39

Demanda de distorsión total TDD% lámpara led

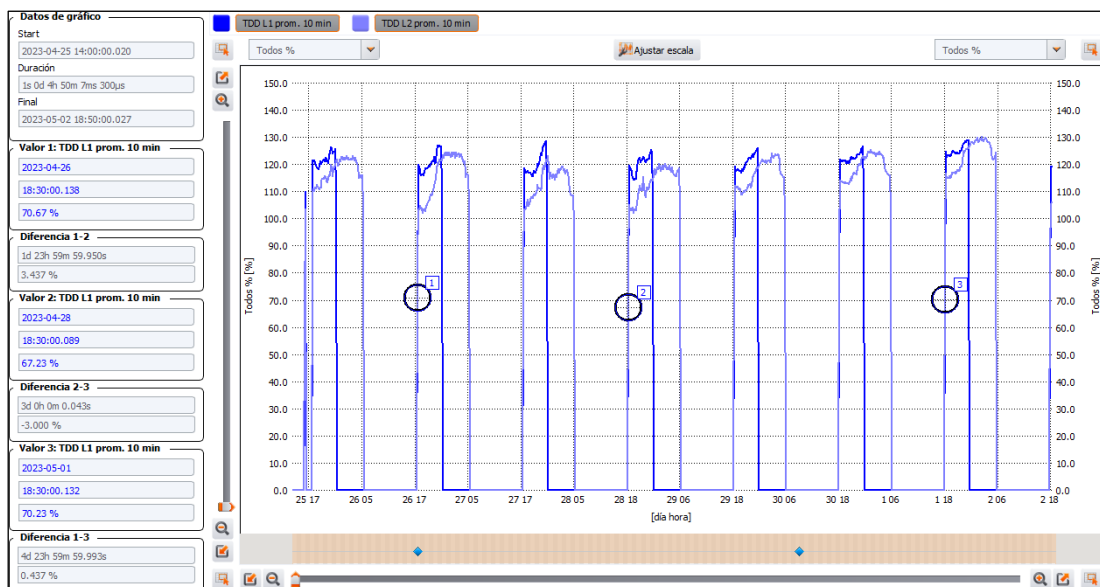
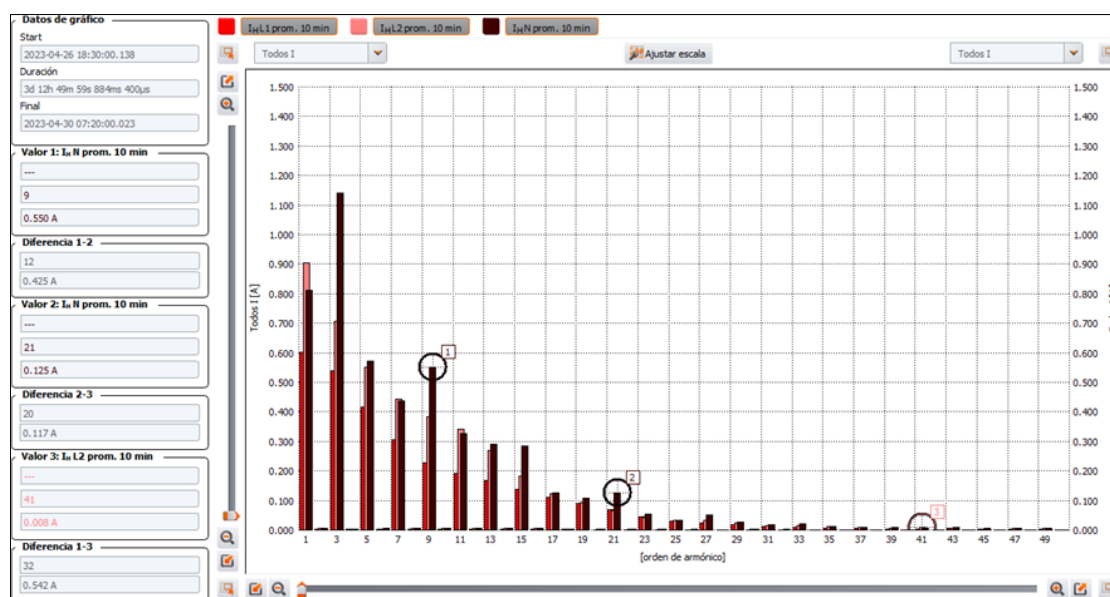


Figura 40

Evaluación de armónicos de corriente lámpara led



En la Figura 40, se puede evidenciar que los armónicos de orden 3, 5, 7, 9, 11, 13, son las más significativas; al hacer la relación sobre la fundamental. Se procede con la obtención de corriente de armónicos respecto a la fundamental de lámpara LED.

Tabla 17

Análisis de armónicos de corriente respecto a la fundamental lámpara led

Orden de Armónico	IH L1	IH L2
3er armónico	90%	78%
5to armónico	69%	61%
7mo armónico	51%	49%
9no armónico	38%	42%
11vo armónico	32%	38%
13vo armónico	28%	30%

2.2.3.4 Resultados y análisis de resultados circuito de iluminación lámpara de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24. Para la obtención de mediciones y su respectivo análisis del circuito de iluminación se ha instalado el analizador de redes Sonel PQM 702. Siendo viernes 21 de abril del presente a las 18:27:54 hrs, se ha iniciado el registro de parámetros eléctricos por un periodo de 3 días y 13 hrs, retirando el equipo el martes 25 de abril a las 07:27:54 hrs. Durante la medición, los valores instantáneos de los

parámetros han sido medidos y promediados en intervalos de 10 minutos. El analizador de redes ha sido instalado en: ITM Sistema de iluminación exterior Edificio 80; de tal manera se registren mediciones, y eventos de circuito de iluminación.

- Análisis de tensión

Según lo expuesto en el capítulo 2.2.3.1., se mantiene el mismo criterios y tolerancias de análisis de tensión, empleando la normativa peruana: Norma Técnica de Calidad de los Servicio Eléctricos (NTCSE) y para el análisis de desbalance de tensión IEC 61000-4-30.

Tabla 18

Evaluación de calidad de tensión y desbalance de tensión lámpara de mercurio

Tensión Nominal	220 V	
Combinación de fases	L 1	L 2
Muestras analizadas	509	509
Muestras fuera de rango (Sobretensiones)	1	1
% de muestras fuera de rango (Sobretensiones)	0.00 %	0.00%
Número de muestras con desbalance	0	

El resultado de la evaluación, considerando una tensión nominal 220 V evidencia que el nivel de tensión a lo largo del periodo de registro de datos; está dentro de rango de desbalance y calidad de tensión permitida por la IEC 61000 y la NTCSE respectivamente. De acuerdo con la Figura 41. de voltaje de máximos y mínimos, se ha evidenciado interrupciones por corte de energía con duración de 3 minutos.

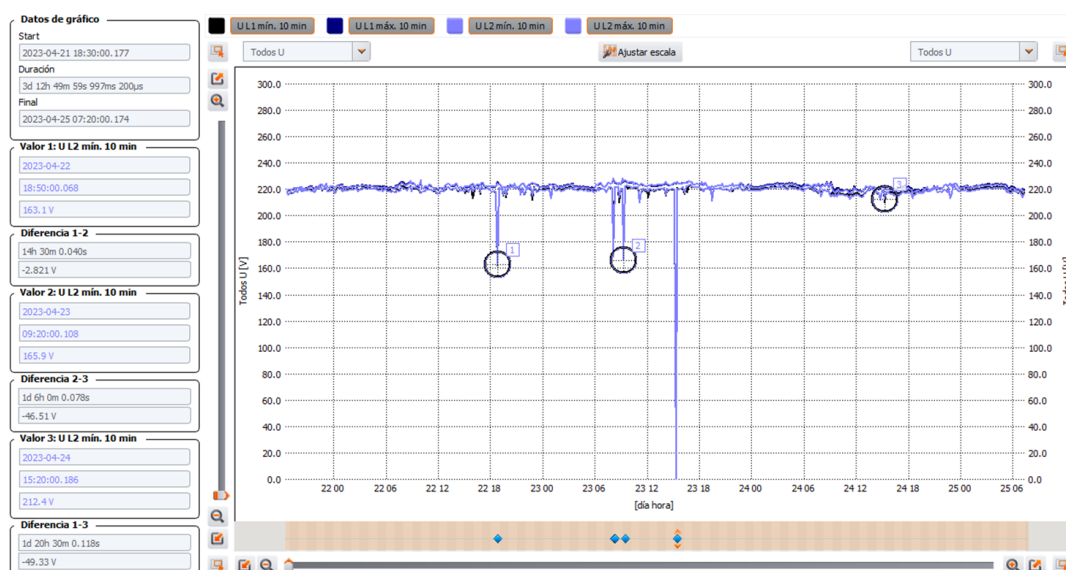
Figura 41

Reporte de interrupciones

Eventos seleccionados										
	Tipo	Fuente	Bandera	Start	Final	Duración	Extremo	Promedio	Umbral	Forma de onda
1	V hueco	L1		2023-04-23 15:16:35.089	2023-04-23 15:19:59.412	3m 24.322s	36.98 mV	1.972 V	198.0 V	
2	V hueco	L1, L2		2023-04-23 15:16:35.089	2023-04-23 15:19:59.431	3m 24.341s	10.45 mV	---	198.0 V	
3	V hueco	L2		2023-04-23 15:16:35.092	2023-04-23 15:19:59.431	3m 24.339s	10.45 mV	2.756 V	198.0 V	
4	V interrupción	L1		2023-04-23 15:16:35.169	2023-04-23 15:19:59.395	3m 24.225s	36.98 mV	0.532 V	11.00 V	
5	V interrupción	L2		2023-04-23 15:16:35.178	2023-04-23 15:19:59.398	3m 24.220s	10.45 mV	0.565 V	11.00 V	
6	V interrupción	L1, L2		2023-04-23 15:16:35.178	2023-04-23 15:19:59.395	3m 24.217s	10.45 mV	---	11.00 V	

Figura 42

Nivel de tensión máximo y mínimo tiempo de integración 10 minutos lámpara de mercurio



Por lo tanto, al estar conectadas las lámparas de mercurio de alta presión estándar HPL-N 125W/542 E27 1CT/24 al circuito de iluminación se obtuvieron niveles de tensión mínima y máxima de 218.7V y 224.84 V respectivamente. Se cumplen los niveles de sobretensiones y subtensiones al conectar las cargas.

Tabla 19

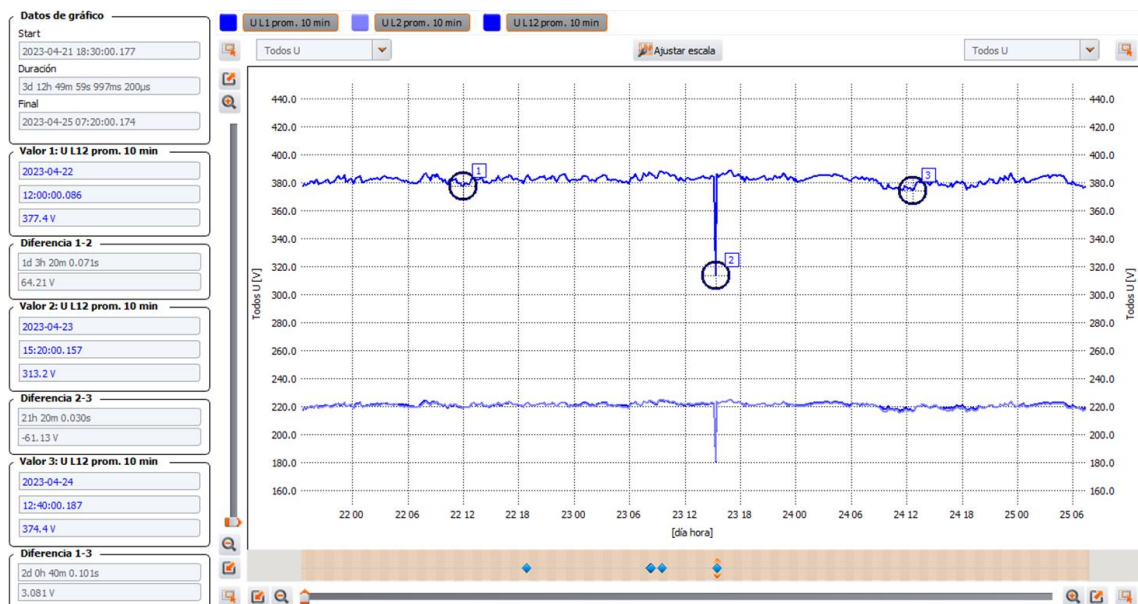
Mediciones de nivel de tensión tiempo de integración 10 minutos lámpara de mercurio

Fecha	Tiempo (UTC-5)	U L1 prom. 10 min [V]	U L2 prom. 10 min [V]	V máx	V mín	Desbalance
21/04/2023	18:40:00	217.85	217.99	217.52	217.85	0.10
21/04/2023	18:50:00	218.7	218.96	218.96	218.7	0.18
21/04/2023	19:00:00	218.47	218.77	218.77	218.47	0.21
21/04/2023	19:10:00	218.8	219.06	219.06	218.8	0.18
21/04/2023	19:20:00	219.26	219.51	219.51	219.26	0.17
22/04/2023	18:40:00	220.69	220.83	229.83	220.69	0.10
22/04/2023	18:50:00	222.29	222.11	222.29	222.11	0.12
22/04/2023	19:00:00	222.97	222.74	222.97	222.74	0.15
22/04/2023	19:10:00	222.21	222.29	222.29	222.21	0.05
22/04/2023	19:20:00	220.88	220.93	220.93	229.88	0.03

23/04/2023	18:40:00	221.92	221.74	221.92	221.74	0.12
23/04/2023	18:50:00	221.3	221.16	221.3	221.15	0.09
23/04/2023	19:00:00	220.65	220.8	220.8	220.65	0.10
23/04/2023	19:10:00	220.8	220.8	220.8	220.8	0.00
23/04/2023	19:20:00	220.94	220.88	229.94	220.88	0.04

Figura 43

Nivel de tensión respecto al tiempo entre fases y respecto al neutro lámpara de mercurio



De acuerdo a la Figura 43., se observa las variaciones del nivel de tensión respecto al tiempo en el periodo de medición con un tiempo de integración de 10 minutos.

- Análisis de THD de tensión:

De acuerdo con la evaluación de distorsión total de armónicos de tensión de los datos del periodo de medición, la carga conectada empleando Lámpara de mercurio de alta presión HPL-N 125W542 E27 1CT24 no generan tensiones armónicas, encontrando valores dentro de rango y cumpliendo según lo indicado por la NTCSE.

Tabla 20

Parámetros de distorsión armónica total según NTCSE lámpara de mercurio

Orden de la armonica o THD	Para tensiones mayores a 60kV	Para tensiones menores iguales a 60kV
THD	3%	8%

Tabla 21

Distorsión armónica total tensión THD v lámpara de mercurio

THD Tensión			
Designación	L1	L2	L3
Número de muestras	509	509	509
Muestras fuera de rango	0	0	0
% de muestras fuera de rango	0.00%	0.00%	0.00%

Se ha realizado en análisis de distorsión armónica total de tensión (THDv%) para el circuito de iluminación empleando lámparas de mercurio de alta presión, en donde no se ha encontrado muestras fuera de rango, es decir, según la NTCSE está dentro de lo normado y recomendado.

Figura 44

Forma de onda de tensión a plena carga 2023-04-22 21:50:00.161 lámpara de mercurio

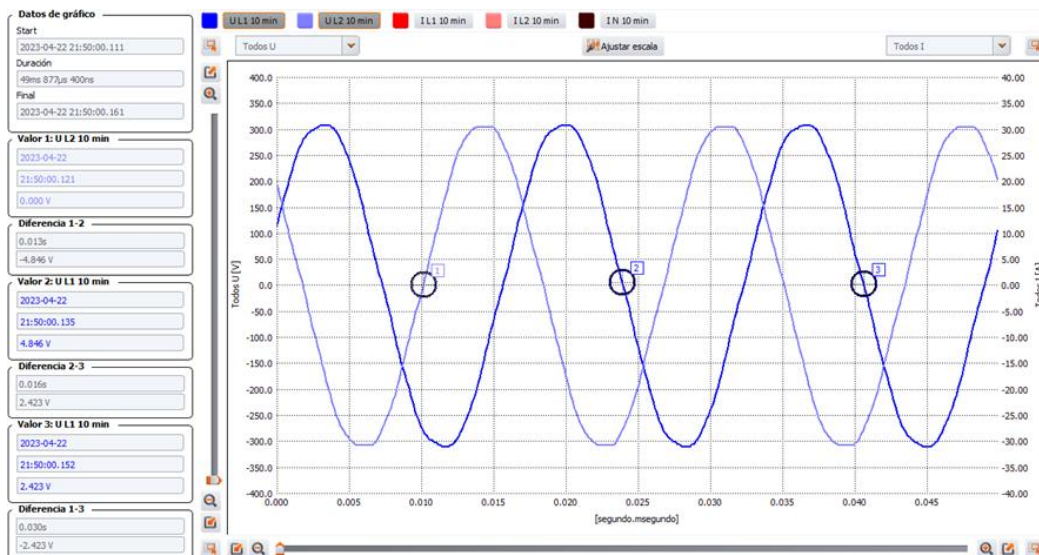


Figura 45

Forma de onda de tensión a media carga 2023-04-23 02:20:00.060 lámpara de mercurio

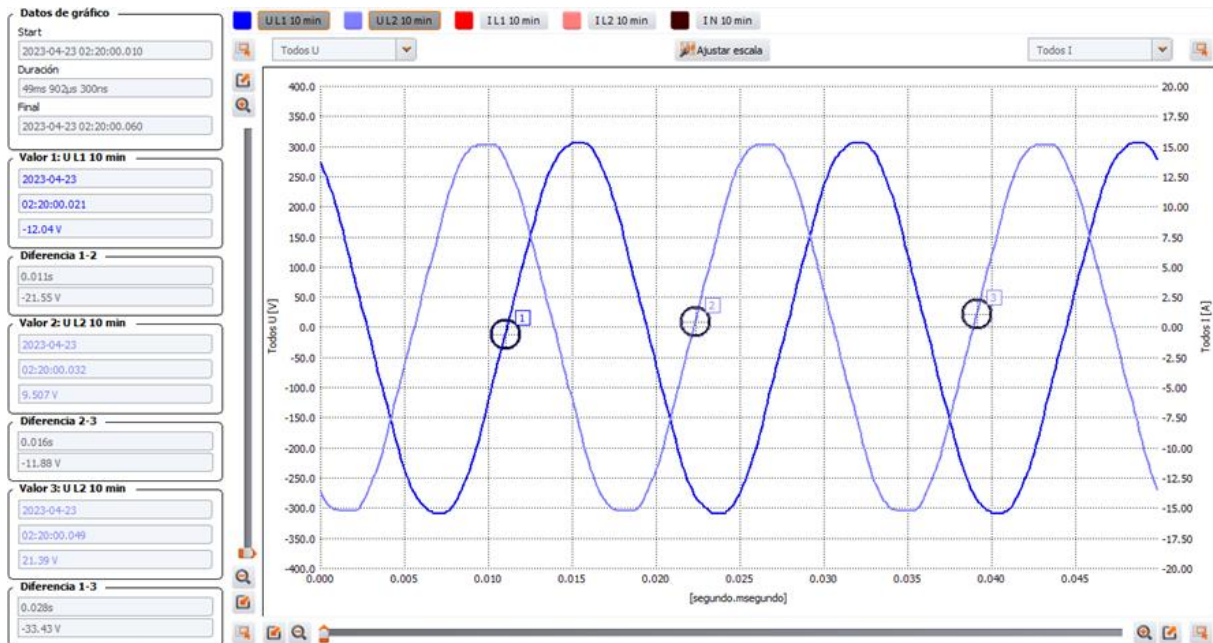


Figura 46

Forma de onda de tensión sin carga 2023-04-23 11:50:00.194 lámpara de mercurio

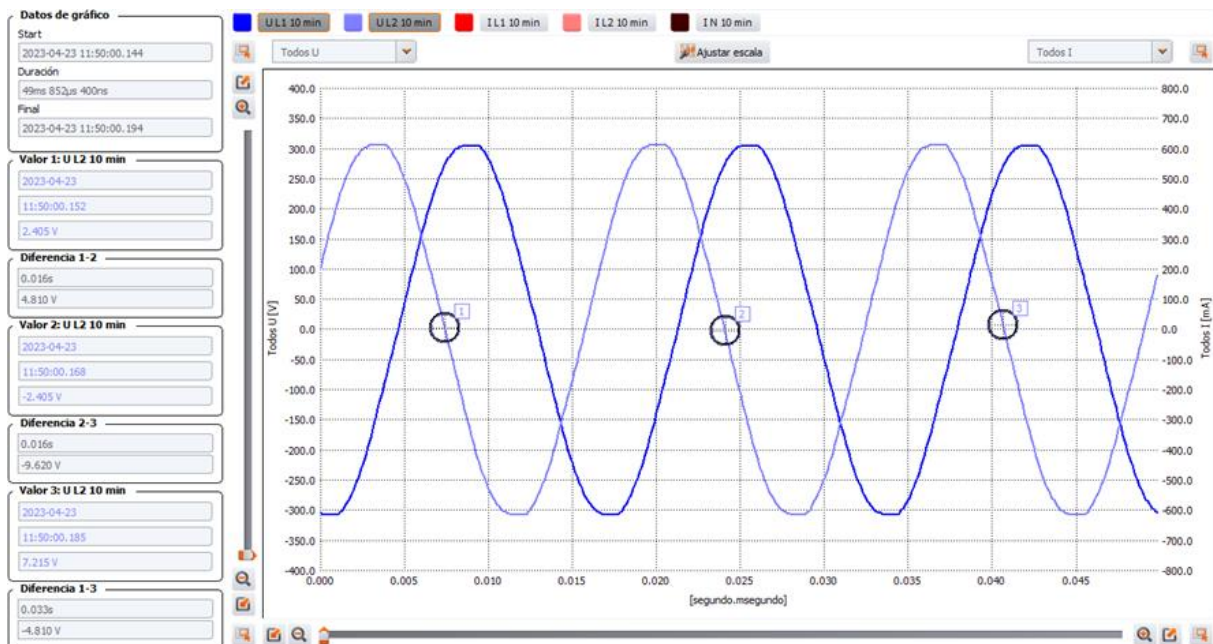
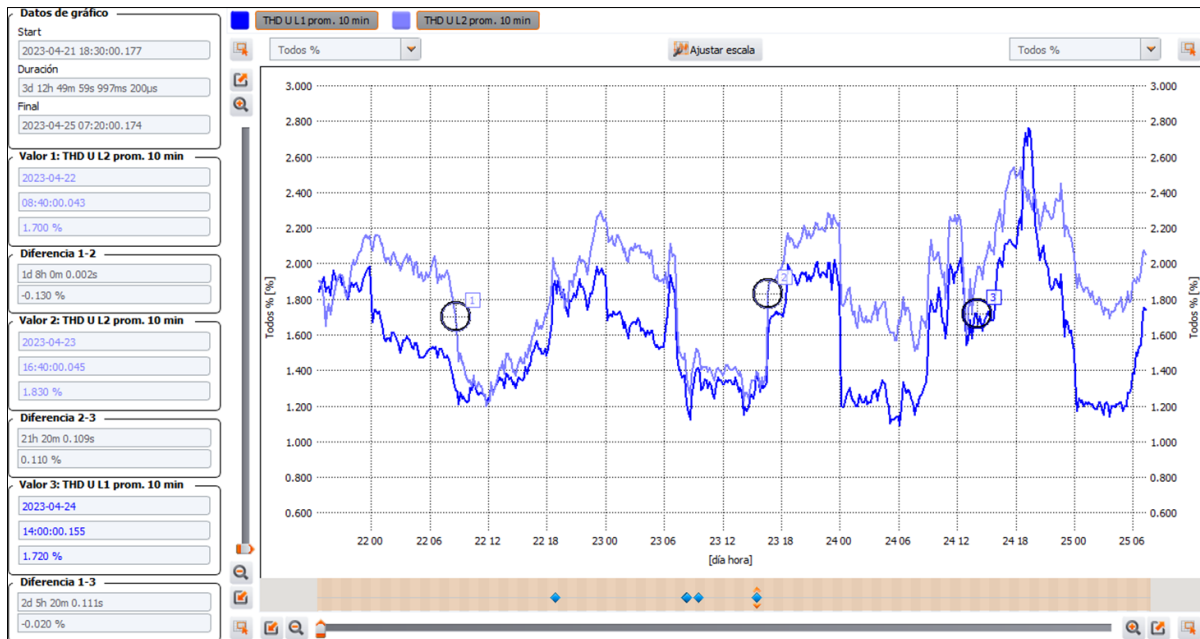


Figura 47

Variación de la distorsión armónica total THDv% lámpara de mercurio



La forma de onda de tensión se muestra uniforme cuando las lámparas de mercurio de alta presión están conectadas a plena, media y sin carga, ya que no hay trascendencia respecto a tensiones armónicas.

- Análisis de corriente:

De acuerdo a las mediciones de corriente obtenidas durante el tiempo de medición.

Tabla 22

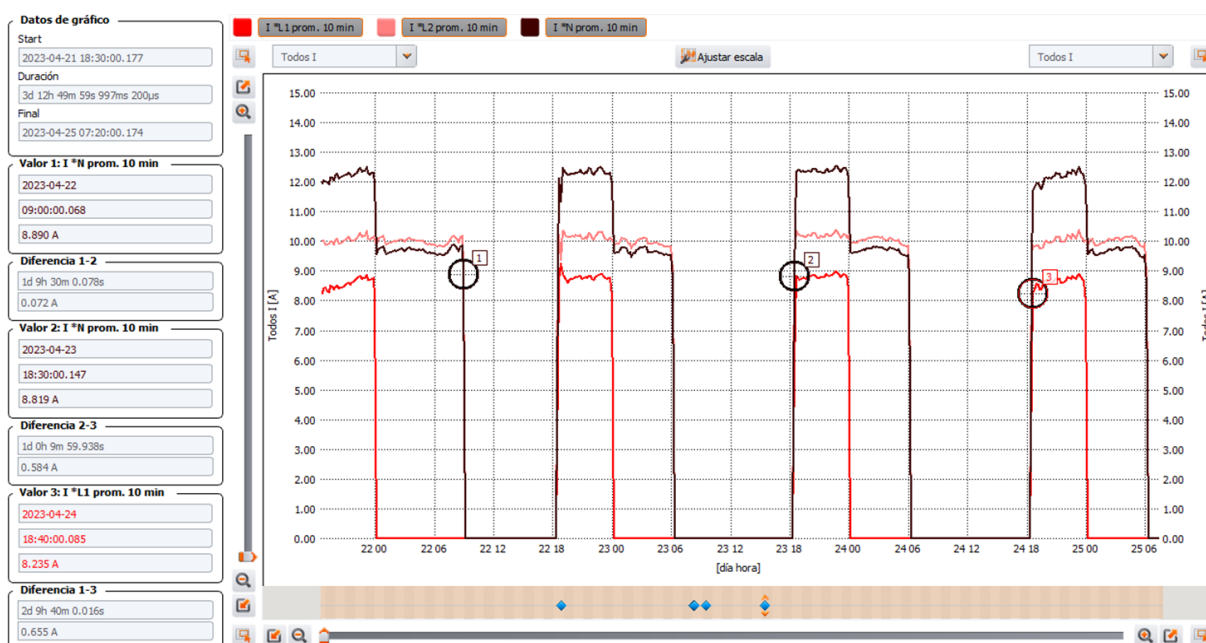
Mediciones de corriente tiempo de integración 10 minutos lámpara de mercurio

Fecha	Tiempo (UTC-5)	I L1 prom. 10 min [A]	I L2 prom. 10 min [A]
21/04/2023	18:40:00	8.227	10.0
21/04/2023	18:50:00	8.393	10.01
21/04/2023	19:00:00	8.43	9.896
21/04/2023	19:10:00	8.306	9.88
21/04/2023	19:20:00	8.26	9.925
22/04/2023	18:40:00	8.667	10.2
22/04/2023	18:50:00	9.233	9.361
22/04/2023	19:00:00	8.886	10.34

22/04/2023	19:10:00	8.833	10.32
22/04/2023	19:20:00	8.725	10.16
23/04/2023	18:40:00	8.824	10.34
23/04/2023	18:50:00	8.742	10.24
23/04/2023	19:00:00	8.697	10.21
23/04/2023	19:10:00	8.71	10.16
23/04/2023	19:20:00	8.745	10.16

Figura 48

Nivel de corriente respecto al tiempo



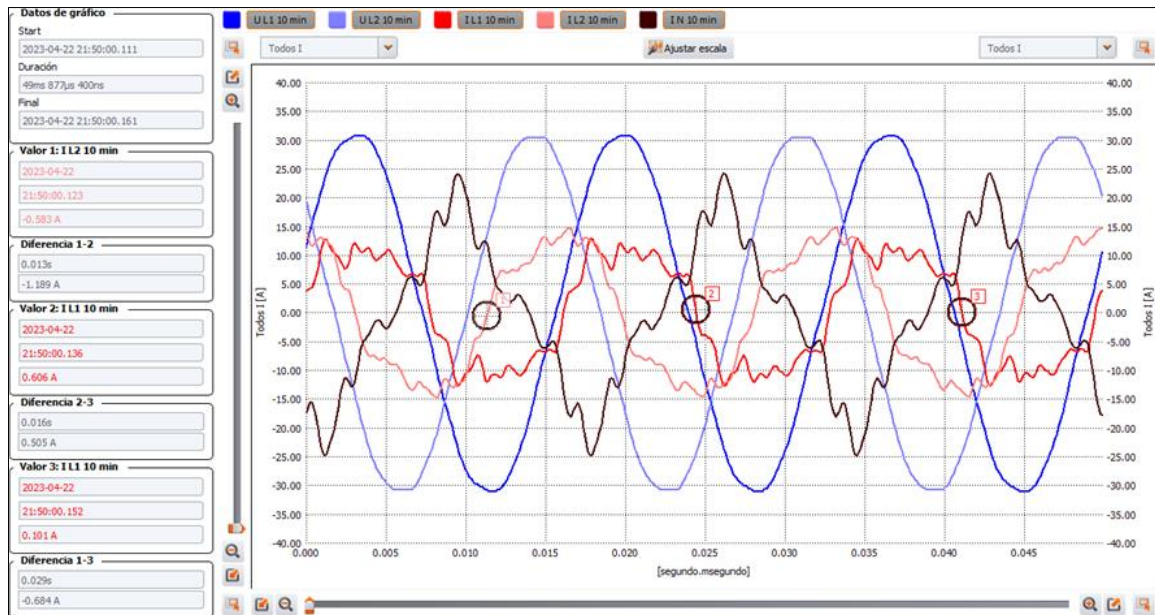
El circuito de iluminación al tener un interruptor horario encargado de activación de las lámparas, así mismo al ser una carga fija de iluminación, se obtuvieron niveles de corriente máxima de 10.37A. Se observa en la Figura 48. el nivel de corriente respecto al tiempo.

- Análisis de armónicos de corriente:

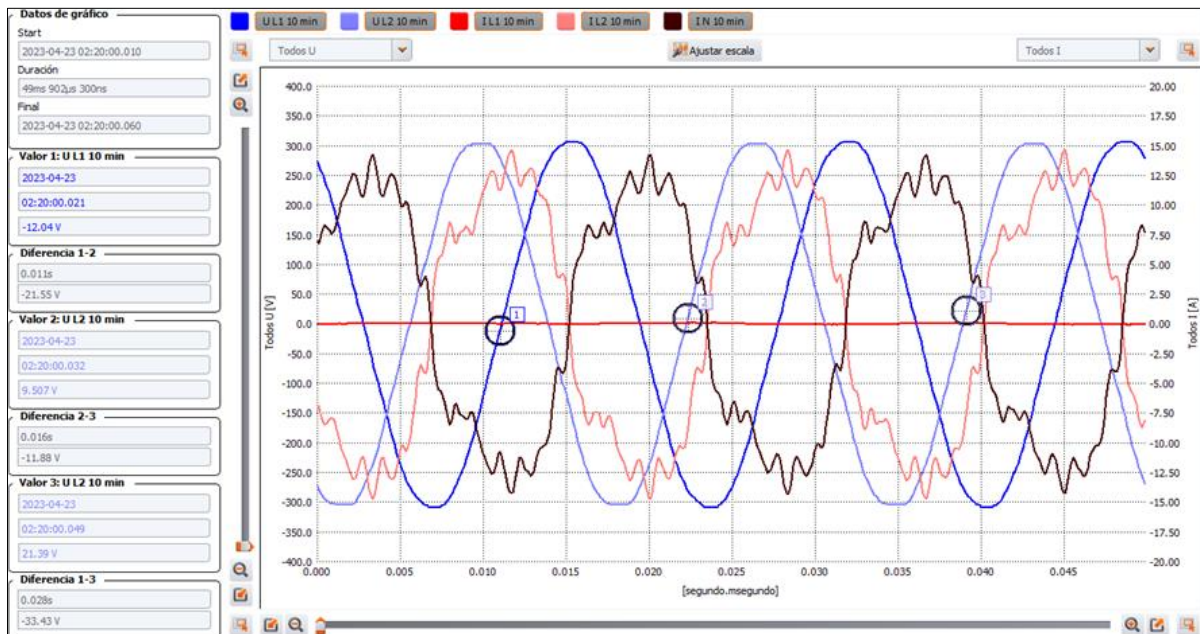
En la Figura 49., se puede observar que la forma de onda de corriente se ve distorsionada significativamente por la presencia de armónicos (cargas no lineales) en los parámetros de corriente.

Figura 49

Forma de onda de corriente a plena carga 2023-04-22 21:50:00.161 lámpara de mercurio

**Figura 50**

Forma de onda de corriente a media carga 2023-04-23 02:20:00.021 lámpara de mercurio



Aplicando el mismo criterio del análisis de la lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR se hará el análisis de distorsión armónica de corriente y demanda de distorsión total, THDi% y TDD% respectivamente. Obteniendo los siguientes resultados para las lámparas de mercurio de alta presión:

Tabla 23*Distorsión armónica de corriente THDi % lámpara de mercurio*

Fecha	Tiempo (UTC-5)	THD I L1 prom. 10 min [%]	THD I L2 prom. 10 min [%]
21/04/2023	18:40:00	20.26	28.74
21/04/2023	18:50:00	19.68	29.02
21/04/2023	19:00:00	19.07	28.57
21/04/2023	19:10:00	18.78	28.38
21/04/2023	19:20:00	18.91	28.78
22/04/2023	18:40:00	24.52	18.03
22/04/2023	18:50:00	22.45	18.23
22/04/2023	19:00:00	25.23	18.42
22/04/2023	19:10:00	25.17	18.07
22/04/2023	19:20:00	25.77	18.54
23/04/2023	18:40:00	25.53	17.96
23/04/2023	18:50:00	25.99	18.06
23/04/2023	19:00:00	26.02	18.26
23/04/2023	19:10:00	25.89	18.47
23/04/2023	19:20:00	25.7	18.38

Se obtuvieron mediciones de distorsión armónica de corriente THDi% fuera de lo recomendado y normado según la IEEE 519, obteniendo valores de hasta 27.42 THDi% según la figura. tasa de distorsión armónica de corriente respecto al tiempo.

Figura 51

Distorsión armónica de corriente THDi % respecto al tiempo lámpara mercurio



Se realizó en análisis de demanda de distorsión total (TDD), teniendo en cuenta la norma IEEE 519, el cual establece valores inferiores a 15%.

Tabla 24

Demanda de distorsión total TDD % lámpara de mercurio

Fecha	Tiempo (UTC-5)	TDD L1 prom. 10 min [%]	TDD L2 prom. 10 min [%]
21/04/2023	18:40:00	17.65	16.56
21/04/2023	18:50:00	17.62	16.11
21/04/2023	19:00:00	16.74	15.46
21/04/2023	19:10:00	16.57	15.2
21/04/2023	19:20:00	16.74	15.38
22/04/2023	18:40:00	17.22	15.09
22/04/2023	18:50:00	16.86	14
22/04/2023	19:00:00	18.12	15.72
22/04/2023	19:10:00	17.97	15.29

22/04/2023	19:20:00	18.15	15.45
23/04/2023	18:40:00	18.2	15.23
23/04/2023	18:50:00	18.33	15.17
23/04/2023	19:00:00	18.26	15.29
23/04/2023	19:10:00	18.2	15.38
23/04/2023	19:20:00	18.15	15.3

Tabla 25
Evaluación de TDD lámpara de mercurio

TDD		
Designación	L1	L2
Número de muestras	509	509
Muestras fuera de rango	132	283
% de muestras fuera de rango	25.93%	55.60%

De acuerdo con el análisis de TDD% en la Figura 52. en donde se presenta la gráfica de demanda de distorsión armónica total TDD% respecto al tiempo, se encuentran valores de demanda de distorsión total de hasta 19% como máximo.

Figura 52

Demanda de distorsión total TDD% lámpara de mercurio

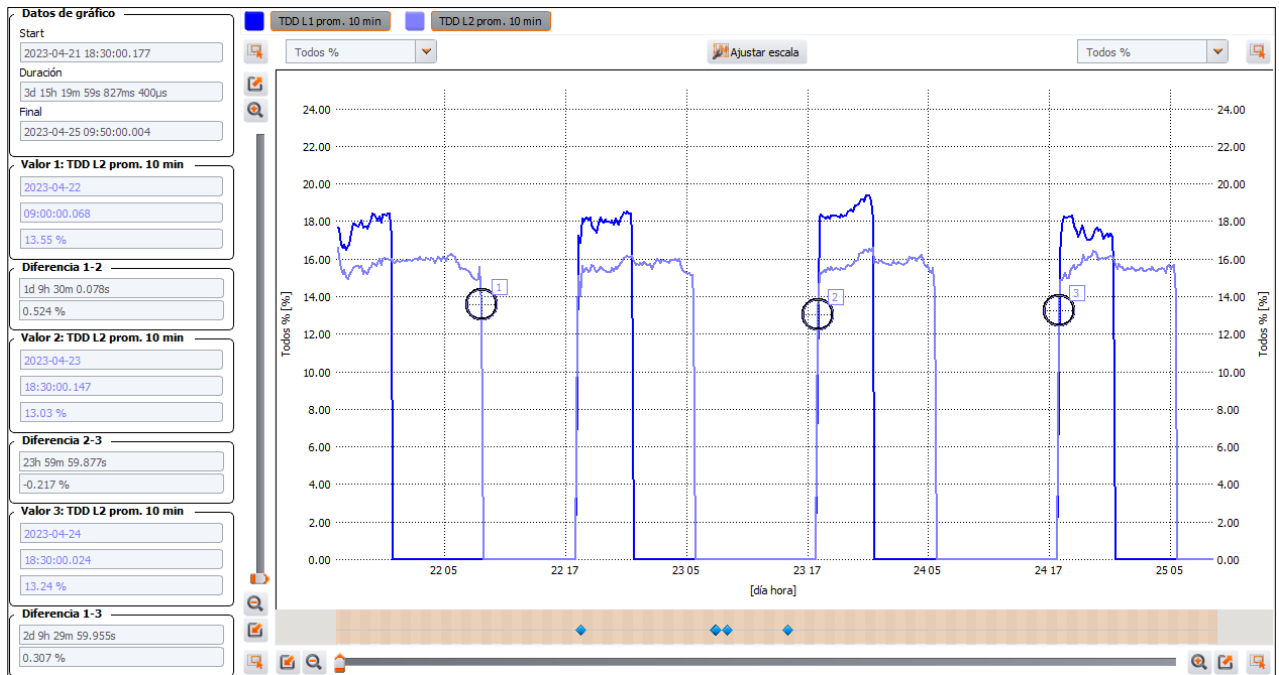
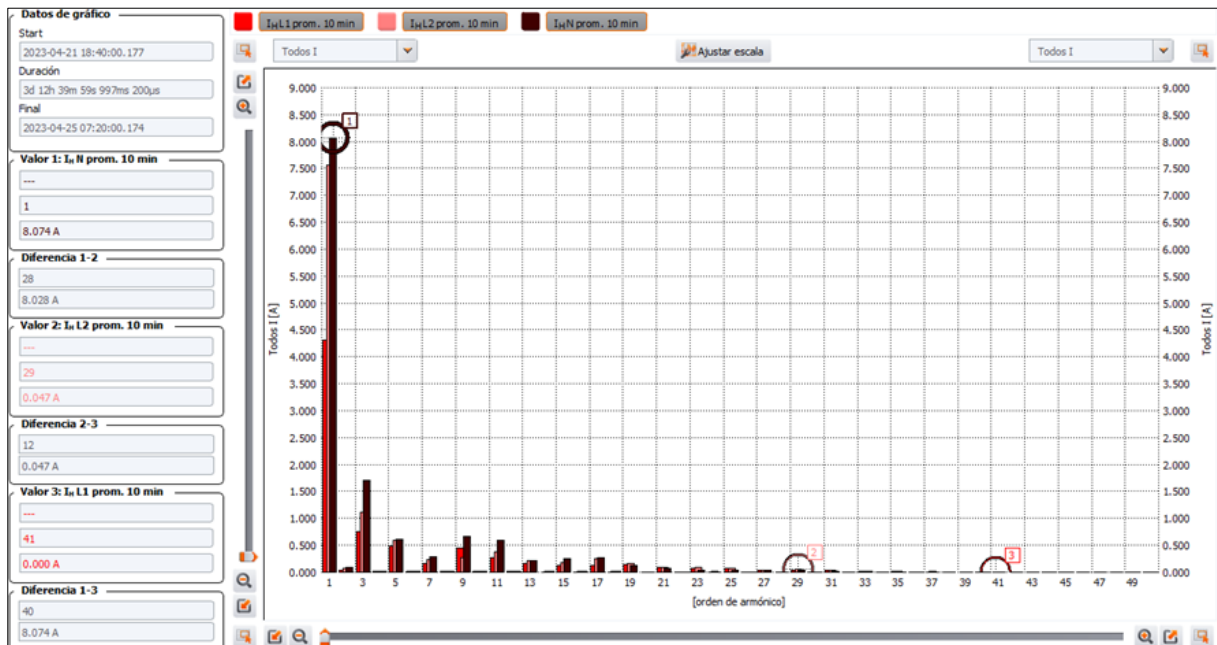


Figura 53

Evaluación de armónicos de corriente



En la Figura 53, se puede evidenciar que los armónicos de orden 3, 5 y 9, son las más significativas; al hacer la relación sobre la fundamental.

Tabla 26*Análisis de armónicos de corriente respecto a la fundamental*

Orden de Armónico	IH L1	IH L2
3er armónico	18%	15%
5to armónico	11%	8%
7mo armónico	4%	3%
9no armónico	10%	4%
11vo armónico	6%	5%
13vo armónico	4%	3%

2.2.4 Cuadro comparativo entre lámparas

Este cuadro comparativo presenta los resultados obtenidos de los ensayos en laboratorio realizados a dos tecnologías de iluminación: las lámparas de mercurio de alta presión y las lámparas LED. La comparación se basa en diversos parámetros eléctricos y lumínicos, como la intensidad de la luz, el consumo de energía, la generación de armónicos y la estabilidad de la tensión. El objetivo es ofrecer una visión clara y detallada de las prestaciones de cada tipo de lámpara, destacando sus ventajas y desventajas. Esta información es útil para ingenieros, diseñadores de iluminación y tomadores de decisiones, ya que les permitirá optimizar el rendimiento energético y la calidad de la iluminación en sus proyectos, basándose en datos empíricos y objetivos.

Tabla 27*Cuadro comparativo entre Lámparas.*

Criterio	Lámparas de Mercurio de Alta Presión	Lámparas LED	Comentarios
Eficiencia lumínica	50 lm/W	117 lm/W	Lámparas LED presenta el doble de eficiencia lumínica.
Vida Útil	20,000 horas	9000 horas	Lámparas de mercurio de alta presión presenta mayor vida útil.

Iluminancia mínima	9.1 luxes	3.6 luxes	Lámpara de mercurio presenta 2.5 veces mayor la iluminancia mínima. Ambos niveles de iluminancia cumplen con la Norma técnica DGE.
Uniformidad de iluminancia U_0	0.62	0.42	Ambas lámparas presentan uniformidad de iluminancia superior a lo normado
Factor de potencia	0.94	0.50	Presenta casi una carga resistiva la lámpara de mercurio de alta presión
Potencia activa luminaria individual	134 W	16 W	El consumo de potencia de lámpara de mercurio es de 8.4 veces la lámpara LED
Potencia activa circuito iluminación	3.8kW	490W	
THDv% max	2.76%	2.54%	Ambas lámparas presentan casi el mismo nivel de THDv%
THDi% max	27.42%	150.85%	Lámparas LED generan un alto contenido de distorsiones y/o perturbaciones por armónicos
TDD%	19.9%	130.1%	
Impacto Ambiental	Contienen mercurio	No contienen mercurio	LED es más amigable con el medio ambiente.
Aplicaciones Comunes	Iluminación pública, industrial y seguridad	Iluminación residencial, comercial, industrial y pública	Usos más frecuentes para cada tipo de lámpara.
Tiempo de Encendido	Tiempo de calentamiento requerido, 3 minutos aprox.	Encendido instantáneo	La lámpara de mercurio de alta presenta un tiempo de calentamiento hasta llegar a su descarga total de vapor de mercurio.

2.3 Discusión de resultados

Análisis energético:

El consumo de potencia de la lámpara de mercurio de alta presión, de acuerdo con las pruebas de laboratorio, es de 134 W, lo que, considerando un periodo de funcionamiento de 12 horas, desde 6:00 pm a 6:00 am, genera un consumo de energía aproximado de 1.6 kWh por día, que significa 48 kWh por mes. Si consideramos un costo de energía industrial (tarifa MT3) de S/ 0.28 por kWh consumido, el costo por lámpara será de S/ 13.44 por mes.

En el caso de las lámparas led, el consumo de potencia es de 16 W, el consumo promedio de energía por día es de 0.20 kWh y el costo por lámpara será de S/ 6 por mes. Es decir, tanto la energía como el costo se reducen en 87.5%.

Análisis de iluminación:

En los ensayos realizados, se obtuvieron niveles de iluminancia de 9.1 lux para las lámparas de mercurio de alta presión y 3.6 lux para las lámparas LED. En ambos casos se superan los valores mínimos establecidos por la norma DGE de alumbrado público.

Las lámparas de mercurio de alta presión, con una iluminancia de 9.1 lux, muestran su capacidad para proporcionar altos niveles de luz, lo que las hace adecuadas para aplicaciones que requieren una iluminación intensa, como en grandes áreas industriales, espacios exteriores y vías públicas. Sin embargo, este alto nivel de iluminancia está directamente relacionado con su mayor potencia (134 W) y un flujo luminoso superior, lo que también resulta en un mayor consumo energético, costos operativos elevados y una mayor generación de calor. Estas características son ventajosas para situaciones que demandan alta visibilidad, pero presentan desventajas en términos de eficiencia energética y sostenibilidad.

Por otro lado, las lámparas LED, con una iluminancia de 3.6 lux y un consumo de tan solo 16 W, demuestran una eficiencia energética notablemente superior. A pesar de que su flujo luminoso es menor, debido a la potencia de la lámpara LED utilizada en el estudio, las lámparas LED son preferidas en aplicaciones donde el ahorro energético y la sostenibilidad son factores clave.

Además de la eficiencia energética, las lámparas LED ofrecen ventajas en términos de calidad de luz. Proporcionan una mejor reproducción de colores y una distribución de la luz más uniforme, lo que es crucial en aplicaciones que requieren una iluminación de alta calidad. La tecnología LED también permite un diseño más flexible de los sistemas de iluminación, con opciones para la regulación de intensidad y control inteligente, características que no son posibles con las lámparas de mercurio de alta presión.

En resumen, aunque las lámparas de mercurio de alta presión proporcionan un mayor flujo luminoso y niveles de iluminancia superiores debido a su mayor potencia y consumo energético (134 W), las lámparas LED, con su menor flujo luminoso y potencia de 16 W,

ofrecen una eficiencia energética superior y una mayor sostenibilidad. Esto las hace más adecuadas para aplicaciones donde estos factores son prioritarios, destacando su relevancia en entornos que buscan combinar eficiencia con calidad de iluminación.

Análisis de armónicos:

En los ensayos realizados, se observó un contenido significativo de demanda de distorsión armónica total (TDD%) en ambas tecnologías de lámparas. La lámpara de mercurio de alta presión (Lámpara HPL-N 125W/542 E27) presentó un TDD% de 19.9%, mientras que la lámpara LED (LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR) mostró un TDD% de 130.1%. Esta diferencia sustancial indica que las lámparas LED generan un mayor contenido de perturbaciones armónicas en comparación con las lámparas de mercurio de alta presión. La lámpara de mercurio de alta presión Lámpara HPL-N 125W/542 E27, con un TDD% de 19.9%, presenta un nivel moderado de perturbaciones armónicas. Aunque no es insignificante, este valor se encuentra dentro de los límites tolerables para muchas aplicaciones, lo que sugiere que estas lámparas pueden operar sin causar mayores problemas de calidad de energía en la red eléctrica. Las lámparas de mercurio de alta presión son, por tanto, una opción relativamente estable en términos de emisiones armónicas. Por otro lado, la lámpara LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR presentó un TDD% de 130.1%, lo que indica un alto nivel de perturbaciones armónicas. Este valor excede considerablemente los límites recomendados para mantener una calidad de energía aceptable en la red eléctrica. La alta generación de armónicos por parte de las lámparas LED puede tener varios efectos adversos, como el sobrecalentamiento de conductores, la reducción de la eficiencia de transformadores y otros equipos eléctricos, y la posible interferencia con dispositivos electrónicos sensibles.

El mayor contenido de perturbaciones armónicas en las lámparas LED resalta una desventaja importante de esta tecnología, a pesar de sus ventajas en eficiencia energética y durabilidad. Las perturbaciones armónicas no solo afectan la eficiencia del sistema eléctrico, sino que también pueden incrementar los costos de operación y mantenimiento debido a la necesidad de mitigar estos efectos a través de filtros y otros dispositivos de corrección.

En conclusión, mientras que las lámparas LED (LEDBright 20W E27 6500K HV 1PF/12 AR) ofrecen beneficios significativos en términos de ahorro energético y vida útil, su alto contenido de perturbaciones armónicas representa una desventaja crítica que debe ser gestionada adecuadamente. Las lámparas de mercurio de alta presión (Lámpara HPL-N 125W/542 E27), aunque menos eficientes energéticamente, presentan un perfil armónico más favorable con un TDD% de 19.9%, lo que las convierte en una opción más estable desde el punto de vista de la calidad de energía. La elección entre estas tecnologías debe considerar tanto los beneficios de eficiencia energética como los impactos potenciales en la calidad de la red eléctrica.

Conclusiones

Las lámparas de mercurio de alta presión, aunque han sido un estándar durante mucho tiempo, tienen sus desventajas. Generan fluctuaciones y armónicos que pueden afectar negativamente otros equipos conectados a la misma red eléctrica. Además, contienen mercurio, lo que representa un riesgo ambiental significativo, ya que su eliminación debe manejarse con extremo cuidado para evitar la contaminación.

Por otro lado, las lámparas LED han demostrado ser más eficientes energéticamente y proporcionan una mejor calidad de iluminación. Sin embargo, es importante señalar que las lámparas LED tienden a generar más armónicos, lo que puede introducir distorsiones en la red eléctrica y potencialmente afectar otros dispositivos electrónicos. A pesar de este inconveniente, las lámparas LED tienen una vida útil más larga y consumen menos energía, lo que las hace más sostenibles y económicas a largo plazo.

A pesar de la generación de armónicos, las lámparas LED presentan ventajas significativas en eficiencia energética y sostenibilidad ambiental en comparación con las lámparas de mercurio de alta presión. Adoptar tecnología LED no solo mejora la eficiencia y reduce los costos operativos, sino que también fomenta prácticas más responsables con el medio ambiente. Este estudio sugiere que, aunque las lámparas LED generen más armónicos, sus beneficios superan estos inconvenientes y el uso de filtros permite mitigar los armónicos que se generan.

En resumen, la transición de lámparas de mercurio de alta presión a lámparas LED representa un avance importante en términos de eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental. Aunque las lámparas LED generan más armónicos, su eficiencia energética es mayor, al igual que su vida útil y tienen un menor impacto ambiental. Por estas razones se convierten en la opción preferida para aplicaciones tanto industriales como residenciales. Adoptar esta tecnología de manera generalizada contribuirá a crear redes eléctricas más eficientes y sostenibles, beneficiando a consumidores y al medio ambiente por igual.

Referencias

- AEMC. (2024). *Instruments Chauvin Arnoux Group. The Lightmeter Model CA811*. Obtenido de <https://www.aemc.com/store/products/environmental-testers/lightmeter-CA811>
- Alexander, C., & Sadiku, M. (2013). *Fundamentos de Circuitos Electricos* (Quinta Edición ed.). Mexico: Mc Graw Hill Education.
- Alfaro, C. (2018). *Propuesta de proptipo de alumbrado inteligente y estudio luminico en exteriores de la ermita de la Universidad de Piura, utilizando tecnologia light emitting diode (LED)*. Piura, Perú: Universidad De Piura.
- ASSELUM. (2017). *Asselum*. Obtenido de Assessors Luminotecnicos: <https://asselum.com/unidades-luminotecnicas-angulo-solido/>
- Circuitos Electricos. (22 de Noviembre de 2017). *El Factor de Potencia: Triangulo de potencia*. Obtenido de <https://circuitoselectricos248.wordpress.com/2017/11/22/4-7-el-factor-de-potencia/>
- Collins, R. (2008). *IEEE Standard 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power*. Obtenido de Quality A Status Update. Recuperado el 2020, de IEEE T&D Conference:: https://ewh.ieee.org/conf/tdc/IEEE_1159_Update_Collins__T&D_2008.pdf
- García, R. (2020). *Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica*. Universidad de Cantabria. Obtenido de Departamento de Electrónica y Computadores. Santander: Tesis en red.: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/10636;jsessionid=A266566716BDC2F97B030453682882AB#page=1>
- Gudilec. (2010). El Mundo De la Iluminación. En Gudilec, *Segunda Parte*.
- InforTel Comunicaciones . (2015). *Tarifacion Electrica: Energia y Potencia*. Obtenido de <https://www.infortel.es/energia%20y%20potencia.pdf>
- Martinez, H. (2020). *Procedimiento para diseñar un sistema de iluminación vial basado en normativa nacional y extranjera. Caso Aplicativo: Avenida Vice- Piura*. Obtenido de [Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico - Eléctrico] Universidad De piura-Perú: <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/cf114239-b181-4295-89b3-ee5b0bbc093f/content>
- Osinergmin. (2013). *Avances tecnológicos en el alumbrado público. Foro Regional: .* Obtenido de Avances Tecnológicos en los Sistemas Eléctricos para la Región Ica. Ica.
- Products Philips. (2017). *Products . Road Lighting*. Obtenido de https://www.lighting.philips.com/prof/outdoor-luminaires/road-and-street/NROADLUM_CA/category

- Ramírez Castaño, S. (2004). *Redes de Distribución de Energía (Tercera ed.)*. Manizales, Colombia: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. .
Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7095/958-9322-86-7_Parte1.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Schubert, E. F. (2018). *Light-Emitting Diodes*. New York: Rensselaer Polytechnic .
- Suntencun, A. (2010). *Tratamiento primario desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las Municipalidades De Guatemala*. [Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio digital de tesis .
Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/1877/1/ALEX%20SUNTEC%C3%9AN%20CASTELLANOS.pdf>
- Velarde, G. (2022). *Estudio de las perturbaciones armónicas en la calidad de energía eléctrica en la Universidad de Piura - campus Lima* [Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico] Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

