

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y  
ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS PRODUCIDAS  
POR LUMINARIAS DE TECNOLOGÍA LED EN UNA RED DE  
ALUMBRADO PÚBLICO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MAYTÉ CAROLINA BRUSIL GUAMÁN**

**DIRECTOR: Dr. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ**

**CODIRECTOR: M.Sc. FRANCISCO VLADIMIR ESPÍN VILLACRÉS**

**Quito, abril 2020**

## **AVAL**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Mayté Carolina Brusil Guamán, bajo nuestra supervisión.

---

**Dr. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**M.Sc. FRANCISCO VLADIMIR ESPÍN VILLACRÉS**  
**CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Mayté Carolina Brusil Guamán, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

MAYTÉ CAROLINA BRUSIL GUAMÁN

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres que me han permitido cumplir mis aspiraciones y metas, y a mi abuelita, ejemplo de fuerza, amor y perseverancia.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, maestros, amigos y a todos los que contribuyeron en el desarrollo de este proyecto de titulación. Un agradecimiento especial al Dr. Hugo Arcos y al M.Sc. Francisco Espín por ser mis mentores y guías en el desarrollo de este proyecto.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS .....	4
1.2 ALCANCE .....	4
1.3 MARCO TEÓRICO.....	5
1.3.1 ILUMINACIÓN .....	5
1.3.2 ALUMBRADO PÚBLICO GENERAL .....	8
1.3.2.1 Normativa .....	9
1.3.2.2 Fuentes artificiales de luz.....	12
1.3.2.2.1 Lámparas de descarga.....	13
1.3.2.2.2 Lámparas LED .....	16
1.3.3 ARMÓNICOS.....	18
1.3.3.1 Armónicos producidos por equipos de iluminación con tecnología de Descarga en Gas.....	20
1.3.3.2 Armónicos producidos por equipos de iluminación con tecnología LED.....	21
1.3.3.3 Normativa .....	27
1.3.3.3.1 Medición de armónicos.....	27
1.3.3.3.2 Límites para las emisiones de corriente armónica de equipos .	30
1.3.3.3.3 Límites para la distorsión armónica de corriente en sistemas eléctricos .....	30
1.3.3.3.4 Límites para la distorsión armónica de voltaje en sistemas eléctricos .....	32
1.3.3.4 Flujo de Armónicos.....	33
1.3.3.4.1 Análisis en el dominio del tiempo .....	34

1.3.3.4.2	Análisis en el dominio de la frecuencia .....	34
2.	METODOLOGÍA .....	35
2.1.	DISEÑO DE ILUMINACIÓN VIAL .....	37
2.1.1	CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA .....	37
2.1.2	TIPO DE LUMINARIAS .....	38
2.1.3	DISPOSICIÓN DE LAS LUMINARIAS.....	38
2.1.4	DOCUMENTACIÓN.....	39
2.2.	ENSAYOS EN EL LABORATORIO.....	40
2.2.1	CIRCUITO DE ENSAYO .....	40
2.2.2	CONDICIONES DE ENSAYO.....	41
2.2.3	FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	42
2.2.4	EQUIPO DE MEDIDA.....	42
2.2.5	TRATAMIENTO DE DATOS.....	45
2.3.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CONTENIDO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN .....	45
2.3.1	RED ELÉCTRICA .....	45
2.3.1.1	Fuentes Armónicas .....	47
2.3.1.1.1	Diversidad .....	47
2.3.1.1.2	Atenuación .....	47
2.4.	ANÁLISIS FINANCIERO.....	48
2.4.1	FLUJO DE FONDOS NETO .....	49
2.4.2	INDICADORES.....	49
2.4.2.1	Valor presente neto .....	49
2.4.2.2	Tasa interna de retorno .....	50
2.4.2.3	Relación beneficio costo.....	50
3.	APLICACIÓN METODOLÓGICA.....	52
3.1.	DISEÑO DE ILUMINACIÓN VIAL .....	52
3.2.	ENSAYOS EN LABORATORIO .....	56
3.2.1	ARMÓNICOS DE CORRIENTE.....	63
3.2.2	DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE Y CORRIENTE .....	66
3.3.	ANÁLISIS ELÉCTRICO.....	69
3.3.1	RED ELÉCTRICA .....	70
3.3.2	MODELO DE LAS FUENTES ARMÓNICAS .....	71
3.3.3	LUMINARIA SAP 400 W VERSUS LED 150 W.....	84
3.3.4	APLICACIÓN DE LOS LÍMITES.....	85

3.3.5	IMPEDANCIA VERSUS FRECUENCIA .....	89
3.3.6	COMPARACIÓN CON OTRAS REDES .....	93
3.4.	ANÁLISIS FINANCIERO .....	97
3.4.1	TIEMPO DE VIDA.....	97
3.4.2	COSTOS .....	98
3.4.3	AHORROS .....	100
3.4.4	FLUJO DE FONDOS .....	101
3.4.5	INDICADORES.....	102
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
4.1.	CONCLUSIONES.....	104
4.2.	RECOMENDACIONES .....	105
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106
	ANEXOS .....	111

## RESUMEN

La iluminación con tecnología LED (Diodo emisor de luz) ha ido rápidamente reemplazando a otras fuentes de iluminación como lámparas de vapor de sodio y vapor de mercurio. Las lámparas y luminarias LED tienen amplias ventajas y en la actualidad se usan en hogares, industrias, monumentos e incluso para el alumbrado público. Por otro lado, estas pueden tener efectos negativos en la calidad de la energía debido a la distorsión armónica de corriente que inyectan a la red. En este sentido el siguiente proyecto evalúa el impacto que la instalación de luminarias LED tendría en las redes de alumbrado público, mediante medición, modelación y simulación de un caso de estudio en el que se reemplazan luminarias de tecnología de vapor de sodio de alta presión por luminarias de tecnología LED.

El proyecto contiene un diseño de iluminación vial y mediciones de contenido armónico que permiten modelar las fuentes armónicas de corriente y voltaje en la red de distribución, se describe una metodología de análisis de perturbaciones armónicas y por medio de los resultados obtenidos de simulación se compara el impacto que tienen las perturbaciones armónicas producidas por cada tipo de tecnología en la red de distribución. Finalmente se realiza un análisis financiero, considerando dos alternativas, la primera, reemplazar las luminarias de vapor de sodio por luminarias LED y la segunda, mantener la tecnología de vapor de sodio en la red de alumbrado público.

**PALABRAS CLAVE:** armónicos, luminarias LED, luminarias de vapor de sodio de alta presión, distorsión armónica, alumbrado público.

## **ABSTRACT**

Light-emitting-diode (LED) lighting is replacing other lighting sources such as mercury and sodium high intensity discharge (HID) lamps. LED technology has multiple advantages over its predecessors and it is currently used in homes, industries, monuments and even for street lighting. On the other hand, LED luminaires and LED lamps could have negative effects on distribution system quality due to the current distortion they inject into the grid. In this sense, the following project evaluates the impact that LED luminaires could have in public lighting networks, by measuring, modeling and simulating a study case in which high pressure sodium luminaires are replaced by LED luminaires.

The project contains a road lighting design and harmonic measurements. Measurement results are used to model harmonic sources in the distribution system. Simulation results of total harmonic distortion on the distribution system allow to compare both technologies. According to the results obtained, the impact of the LED luminaires on the system is analyzed. Finally, a financial analysis is carried out, considering two alternatives, the first, replacing HID luminaires with LED luminaires, and the second, maintaining HID technology in the public lighting network.

**KEYWORDS:** harmonics, LED luminaires, high pressure sodium luminaires, harmonic distortion, street lighting.

# 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la iluminación ha vivido una gran revolución con la eliminación gradual de lámparas con filamentos de tungsteno y el reemplazo de lámparas fluorescentes e incandescentes por lámparas de tecnología LED (Light Emitting Diodes). El rápido desarrollo de la iluminación por tecnología LED durante las últimas décadas, se debe a su alta eficiencia, confiabilidad, construcción robusta, bajo consumo de energía y durabilidad, tal como sostienen Yam & Hassan [1].

Las fuentes de luz convencionales, como las bombillas de filamento y las lámparas fluorescentes, dependen de la incandescencia o la descarga en gases, estos dos procesos se acompañan de grandes pérdidas de energía, mientras que la tecnología LED basada en materiales semiconductores tiene el potencial de convertir electricidad en luz de una forma más eficiente [1]; ésta característica sumada a una mayor durabilidad permite reducir el impacto ambiental y monetario en relación con sus antecesores [2].

A nivel mundial desde que aparecieron las primeras regulaciones de eficiencia energética y alumbrado público, varias ciudades empezaron a reemplazar sus fuentes de iluminación por tecnología LED. Para el año 2014, el 19 % del consumo de energía a nivel mundial provenía de este tipo de tecnología, mientras que en América Latina este valor rodeaba el 24 % [3]. De acuerdo con Sharma [4], en el 2017 esta tecnología representaba aproximadamente el 20 % del mercado de iluminación, mientras que los observadores de la industria prevén que el número aumente hasta un 70 % para el 2020.

En países como Estados Unidos, en más de una docena de ciudades grandes y medianas, desde Chicago a Boise, se han completado proyectos de modernización o están en el proceso de reemplazar sus lámparas con nuevas y eficientes lámparas LED. En total estas ciudades han reemplazado aproximadamente 600 000 lámparas de alumbrado público y han visto una reducción de más de 198 millones de kWh [5].

En Ecuador en el año 2014, de acuerdo a la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) [6], como parte del proyecto integral de eficiencia energética en el Centro Histórico, se colocaron 1 100 luminarias. El proyecto consistió en sustituir las luminarias de halogenuros metálicos y vapor de sodio de alta presión, por luminarias de tecnología LED con el fin de reducir el consumo de energía en alrededor del 65 %, mejorar los niveles de iluminación, disminuir la contaminación lumínica y minimizar los costos de mantenimiento.

En marzo del 2016 el municipio de Rumiñahui, ubicado al sureste de Quito, inauguró el nuevo sistema de iluminación con tecnología LED para la plaza cívica, que reemplazo al

anterior que había cumplido su vida útil [7]. De manera similar otros municipios de las ciudades de todo el país han contemplado proyectos de iluminación con tecnología LED. En Guayaquil, por ejemplo, la Torre Morisca del Malecón es ahora iluminada por sistemas de tecnología LED que además son sistemas de iluminación artística que permiten resaltar la arquitectura de grandes obras como son el faro del cerro Santa Ana, el monumento del Sagrado Corazón, entre otros. Además, Guayaquil en la actualidad tiene varias de sus Avenidas iluminadas por luminarias LED, las cuales han sido instaladas reemplazando a luminarias de sodio de 250 W, por LEDs de 95 W, tipo ornamental, logrando un ahorro de energía del 38 % [8].

Como se puede observar la tecnología LED ha ido ganando terreno en el país y se espera que aún mas proyectos de sustitución estén por realizarse en todo el territorio. Por su parte la EEQ ha realizado proyectos de iluminación LED con telegestión y transmisión de datos en la Av. Amazonas y en el Centro Histórico, y ha llevado a cabo el reemplazo de luminarias en algunas de sus centrales de generación eléctrica. Para el año 2019 se espera la entrega de proyectos como la sustitución de lámparas fluorescentes por tecnología LED en las subestaciones de la EEQ, cuyo propósito como lo señala Andrade [9] es: “reducir los desechos peligrosos generados en las subestaciones por la sustitución de lámparas convencionales por lámparas LED”.

La instalación creciente de lámparas LED se ha realizado paralelamente con el desarrollo de numerosos estudios, la mayoría dedicados a la eficiencia energética de los LED, otros a la distribución de luz y rendimiento visual de las lámparas, y unos pocos centrados en las emisiones armónicas de lámparas LED. El estudio *“Un análisis de los armónicos de las lámparas LED”* [10] publicado en el Simposio de Asia y el Pacífico sobre Compatibilidad Electromagnética (2012), concluyó del análisis de una muestra de doce lámparas LED (diferentes potencias y fabricantes), que todas las lámparas LED generaban armónicos debido al uso de un convertidor electrónico de potencia. Los valores medidos de distorsión armónica total de corriente (THDI) variaron entre 30,94 % y 174,38 % y dependían de las diferentes marcas pues éstas empleaban diversas tecnologías de balasto y filtros para reducir el contenido armónico. En el año 2013, Uddin, Shareef y Mohamed [11] realizaron el mismo estudio, pero incluyeron el análisis de grupos de lámparas concluyendo que el contenido armónico no variaba significativamente si se usaban juntas varias lámparas LED con el mismo tipo de balasto, la generación armónica cambiaba cuando se usaban juntas lámparas LED con diferentes tipos de balasto.

En el 2011, Paula Acuña [12] en su tesis para Magister en Ingeniería Eléctrica analizó el impacto de las luminarias LED usadas en el alumbrado público en diferentes condiciones,

en un primer escenario analizó la red de alumbrado público del campus de la Universidad Nacional de Colombia, y en base a modelos y simulaciones concluyó que la instalación de tecnología LED en el alumbrado público disminuía la distorsión armónica de corriente THDI en un 64 % con relación al escenario de iluminación con tecnología de Sodio de Alta Presión (SAP). Posteriormente analizó la distorsión armónica de corriente en el proyecto piloto de Telegestión y Tecnología LED instalado en la calle Mas de Roda de la ciudad de Barcelona (España), concluyendo que el contenido armónico medido en la red no cumplía con la norma técnica internacional IEC 61000-3-2, mostrando que las cargas no lineales asociadas con este tipo de tecnología pueden incidir negativamente en la calidad de la energía y el ahorro energético esperado.

Si bien las emisiones de armónicos producidos por lámparas de tecnología LED y su impacto en las redes de distribución no han sido ampliamente investigados, los estudios [10], [11], [12] indican que el impacto dependerá del tipo de tecnología LED empleada, de sus combinaciones y en el caso de sistemas de alumbrado público con telegestión dependerá adicionalmente de los sistemas de control que se empleen.

Los estudios dedicados a la eficiencia energética de los LED, a su distribución de luz y rendimiento visual y al estudio de su contenido armónico, conducen al aprovechamiento máximo de los beneficios de esta tecnología. El desarrollo de proyectos de iluminación con tecnología LED para el alumbrado público debe ir de la mano de estudios que analicen el impacto de sus emisiones armónicas en las redes de distribución, de forma que se puedan advertir posibles riesgos y efectos.

## **1.1 OBJETIVOS**

El objetivo general de este Proyecto Técnico es estudiar el impacto de las perturbaciones armónicas producidas por luminarias de tecnología LED (Light Emitting Diode) en una red de alumbrado público.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Desarrollar un modelo de simulación de luminaria LED destinada al alumbrado público en base a mediciones realizadas en el Laboratorio de Luminotecnia del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE).
- Elaborar un modelo de simulación de una red de alumbrado público.
- Determinar el impacto de las perturbaciones armónicas producidas por las luminarias LED, por medio de la simulación del modelo de la red de alumbrado público y de las luminarias LED.

## **1.2 ALCANCE**

Se realizarán mediciones de armónicos en luminarias de tecnología LED con la colaboración del Laboratorio de Luminotecnia del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), además se obtendrá la información necesaria para la modelación de una red de distribución de alumbrado público.

En base a la información obtenida de mediciones y bases de datos, se modelará la red de alumbrado público en el software CYME de tal forma que se ajuste a las condiciones de operación actuales para luego por medio de simulaciones, analizar el impacto que tendría la instalación de luminarias de tecnología LED.

## 1.3 MARCO TEÓRICO

### 1.3.1 ILUMINACIÓN

La regulación ARCONEL 006/18 “Prestación del Servicio de Alumbrado Público General” [13] define los siguientes conceptos básicos:

#### Flujo luminoso ( $\Phi$ )

Es la potencia emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible [13]. Su símbolo es ( $\Phi$ ), su unidad es el lumen (lm) y se lo calcula usando la Ecuación 1.1.

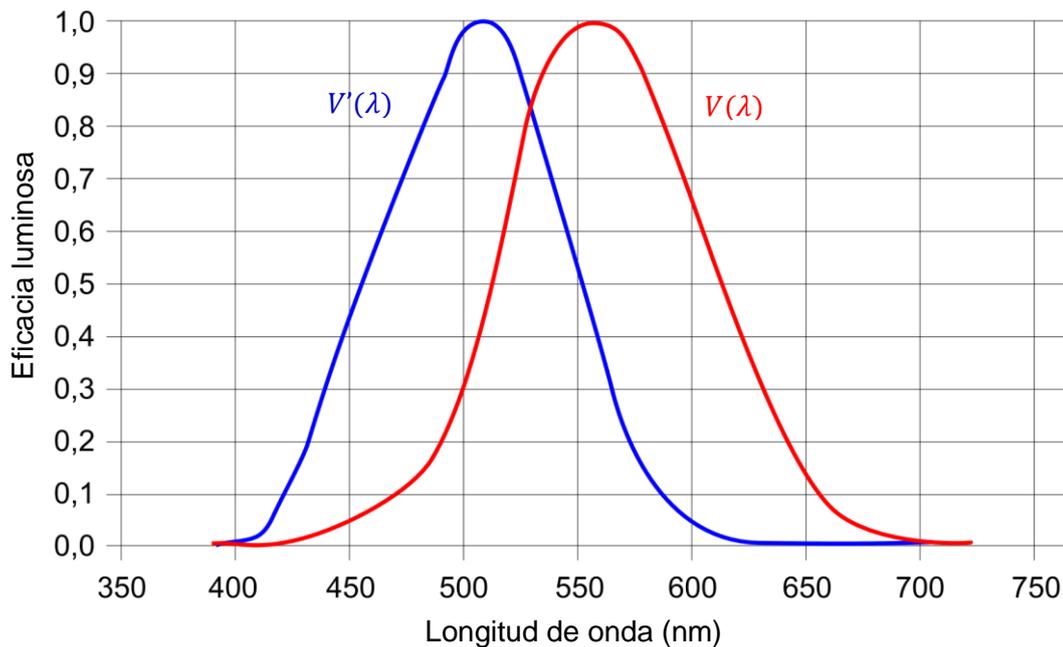
$$\Phi_{lum} = k_m \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad [lm] \quad (1.1)$$

Donde:

$k_m$ : es la eficacia luminosa

$\Phi(\lambda)$ : flujo de la fuente de luz

$V(\lambda)$ : valores de la curva fotópica



**Figura 1.1** Curva para visión fotópica  $V(\lambda)$  y escotópica  $V'(\lambda)$  [14]

El lumen se puede definir como la cantidad de energía radiante emitida por segundo por una fuente de luz ponderada con la sensibilidad espectral del ojo humano. La sensibilidad del ojo humano se caracteriza por medio de las curvas: fotópica (visión diurna) y escotópica (visión nocturna), obtenidas de acuerdo a resultados experimentales (ver Figura 1.1).

La curva fotópica es la base de todas las unidades fotométricas, en la cual la máxima sensibilidad del ojo humano se alcanza a una longitud de onda de luz ( $\lambda$ ) de 555 nm. Los cálculos han demostrado que 1 W de potencia radiada a esa longitud de onda es igual a 683 lm. A este valor se lo conoce como la “Eficacia luminosa espectral máxima” [15].

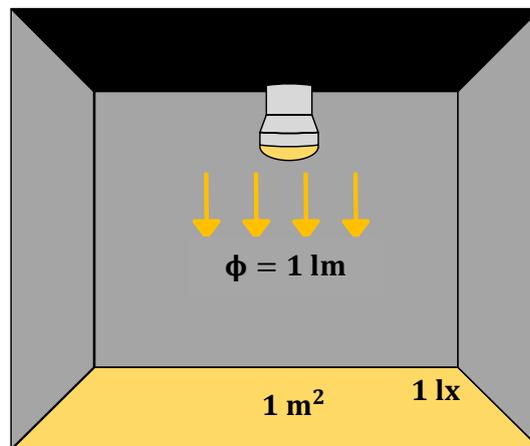
La Eficacia Luminosa es la relación entre el flujo luminoso y la potencia disipada, expresada en lúmenes por vatio (lm/W).

### **Illuminancia (E)**

Es la densidad del flujo luminoso que incide sobre una superficie ( $A$ ). Este parámetro es independiente de la dirección en la que el flujo luminoso alcanza la superficie [15], su símbolo es ( $E$ ) y puede ser expresada en lux (lx) o en lumen por metro cuadrado (lm/m<sup>2</sup>) [13].

$$E = d\Phi/dA \text{ [lx]} \quad (1.2)$$

La iluminancia puede definirse como la relación entre el flujo luminoso incidente sobre una superficie y el área de dicha superficie como se observa en la Figura 1.2.

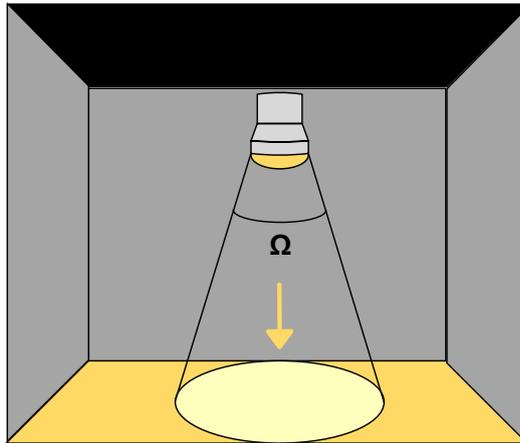


**Figura 1.2** Iluminancia [Elaboración propia]

### **Intensidad Luminosa (I)**

Es el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido ( $\Omega$ ) en una dirección específica. Su símbolo es ( $I$ ) y su unidad la candela (cd) [13].

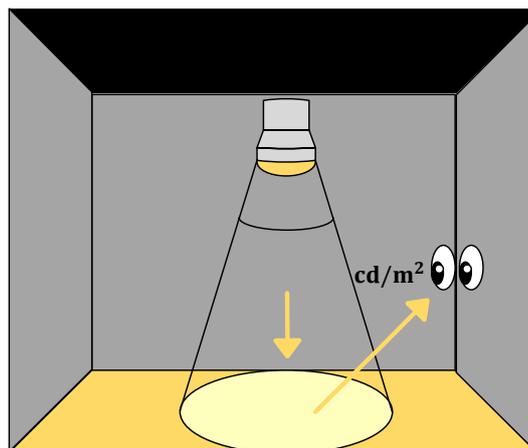
$$I = d\Phi/d\Omega \text{ [cd]} \quad (1.3)$$



**Figura 1.3** Intensidad luminosa [Elaboración propia]

### Luminancia (L)

Es la relación entre la intensidad luminosa y la superficie vista por el ojo en una dirección determinada. Su símbolo es ( $L$ ) y su unidad es la candela por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) [13].



**Figura 1.4** Luminancia [Elaboración propia]

### Temperatura de color (TC)

El término temperatura de color se usa para describir el color de una fuente en comparación con el color de un cuerpo negro. La temperatura de color es la temperatura de un cuerpo negro, en grados kelvin (K), para que este tenga un color igual al de la fuente de luz [15].

### Luminancia promedio de la calzada ( $L_m$ )

Valor mínimo que debe ser mantenido a lo largo de la vida útil de la instalación, depende de la distribución de la luz de la luminaria, el flujo luminoso de las lámparas y de las propiedades de reflexión de la calzada [13].

### **Uniformidad general de luminancia de la calzada ( $U_o$ )**

Es la relación entre la luminancia mínima y la luminancia promedio de la vía. Su valor depende de los mismos factores que inciden en la luminancia promedio [13].

$$U_o = L_{min}/L_{prom} \quad (1.4)$$

### **Uniformidad longitudinal sobre la calzada ( $U_L$ )**

Es la relación entre la luminancia mínima y la luminancia máxima, medidas en dirección longitudinal a lo largo del eje central de cada carril de circulación [13].

$$U_L = L_{min}/L_{máx} \quad (1.5)$$

### **Deslumbramiento (TI)**

El deslumbramiento se lo cuantifica a través de la variable TI, la cual se calcula para el estado inicial de la instalación, mediante la siguiente fórmula [13]:

$$TI = \frac{k \times E_o}{L_{prom}^{0.8} \times \theta^2} \quad (\%) \quad (1.6)$$

Donde:

$k$ : factor que varía con la edad del observador se usará el valor de 650

$E_o$ : iluminancia total inicial producidas por las luminarias, en su estado nuevo, sobre un plano normal a la línea de visión y a la altura del ojo del observador

$L_{prom}$ : luminancia inicial promedio

$\theta$ : ángulo en grados formado entre la línea de visión y el centro de cada luminaria

### **Relación de entorno (SR)**

Es la relación de la iluminancia promedio en bandas de 5 metros de ancho cada una adyacente a los dos bordes de la calzada para la iluminancia promedio en bandas de 5 metros de ancho dentro de la calzada. Para calzadas dobles, ambas calzadas deben tratarse conjuntamente como si fueran una, a menos que estén separadas por más de 10 metros [13].

## **1.3.2 ALUMBRADO PÚBLICO GENERAL**

El alumbrado público general es la iluminación de vías públicas para tránsito de personas y/o vehículos. Se excluye la iluminación de zonas comunes de unidades inmobiliarias declaradas como propiedad horizontal, la iluminación pública ornamental (iluminación de parques, plazas, espacios deportivos, iglesias, etc.) e intervenida [13].

### 1.3.2.1 Normativa

Las empresas distribuidoras responsables de la prestación del Servicio de alumbrado público general (SAPG) deben cumplir con los parámetros técnicos establecidos en la regulación ARCONEL 006/18 “Prestación del Servicio de Alumbrado Público General”. Para lo cual es necesario definir los tipos de vías públicas y sus requerimientos.

#### Vías con tráfico motorizado

Los tipos de vías públicas para tráfico motorizado se clasifican de M1 a M5 en función de los siguientes parámetros: la vía pública, densidad, separación, complejidad de tráfico y la existencia de facilidades de control de tráfico como señales de tránsito, semáforos, marcas en la calzada, etc.

**Tabla 1.1.** Clases de alumbrado vías con tráfico motorizado [13]

Descripción de la vía	Tipo de iluminación
Vías de alta velocidad, con pistas separadas libres de intersecciones al mismo nivel y con accesos completamente controlados, autopistas, autovías. Con densidad de tráfico y complejidad de circulación (Nota <sup>1</sup> ): <b>Alta</b> (más de 1 000 vehículos/hora) <b>Media</b> (entre 500 y 1 000 vehículos/hora) <b>Baja</b> (entre 150 y menos de 500 vehículos/hora)	<b>M1</b> <b>M2</b> <b>M3</b>
Vías de alta velocidad, vías con doble sentido de circulación. Con control de tráfico (Nota <sup>2</sup> ) y separación (Nota <sup>3</sup> ) de diferentes usuarios de la vía (Nota <sup>4</sup> ): <b>Pobre</b> <b>Bueno</b>	<b>M1</b> <b>M2</b>
Vías urbanas de tráfico importante, carreteras radiales. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía: <b>Pobre</b> <b>Bueno</b>	<b>M2</b> <b>M3</b>
Vías secundarias de conexión, carreteras distribuidoras locales, vías de acceso principales residenciales, carreteras que proporcionan acceso a propiedades y conducen a conexiones de carreteras. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía: <b>Pobre</b> <b>Bueno</b>	<b>M4</b> <b>M5</b>

<sup>1</sup> La complejidad del trazado de carreteras se refiere a la infraestructura, movimiento del tráfico y alrededores visuales. Factores que deben considerarse son: Número de carriles, pendientes; señales e indicadores; rampas de entrada y salida, vías de incorporación, rotondas, etc.

<sup>2</sup> Control del tráfico se refiere a la presencia de indicadores y señales y a la existencia de regulaciones. Los métodos de control son: Semáforos, reglas prioritarias, regulación y señales prioritarias, señales de tráfico, señales de dirección y marcas en la calzada. Cuando están ausentes o no hay control de tráfico es considerado como pobre y viceversa.

<sup>3</sup> La separación puede ser por medio de líneas trazadas para tal fin o por la restricción de uno de los tipos de tráfico. Puede considerarse el menor grado de iluminación como adecuado cuando exista separación.

<sup>4</sup> Los diferentes tipos de usuarios de carreteras son, por ejemplo, vehículos de turismo, camiones, vehículos lentos, autobuses, automóviles, bicicletas y peatones.

Los requisitos fotométricos mínimos para cada tipo de iluminación, de acuerdo al tipo de vía motorizada se establecen en la Tabla 1.2 para el criterio de luminancia y en la Tabla 1.4 para diseños con base en el criterio de iluminancia.

**Tabla 1.2.** Luminancia de la calzada para tráfico motorizado [13]

Clase de Iluminación	Campo de Aplicación				
	Todas las Vías			Vías sin o con pocas intersecciones	Vías con aceras no iluminadas para clases P1 a P4 (ver Tabla 1.6)
	Luminancia promedio $L_{prom}$ (cd/m <sup>2</sup> ) Mínimo mantenido	Factor de uniformidad $U_o$ Mínimo	Tl% Máxima inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia $U_L$ Mínimo	Relación de entorno SR Mínima
<b>M1</b>	2,0	0,4	10	0,7	0,5
<b>M2</b>	1,5	0,4	10	0,7	0,5
<b>M3</b>	1,0	0,4	10	0,7	0,5
<b>M4</b>	0,8	0,4	10	NR <sup>5</sup>	NR
<b>M5</b>	0,6	0,4	10	NR	NR

**Tabla 1.3.** Características de la superficie [13]

Clase	Características de la superficie
<b>R1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficies de asfalto con un mínimo del 15 % de materiales reflectivos o materiales artificiales claros o al menos un 30 % de anortositas<sup>6</sup> muy brillantes;</li> <li>• Superficies que contienen gravas que cubren más del 80 % de la superficie de la calzada, y las gravas constan de gran cantidad de material claro, o reflectivos o están compuestas al 100 % de anortositas muy brillantes;</li> <li>• Superficies de calzada de hormigón de concreto.</li> </ul>
<b>R2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superficies con textura rugosa que contienen agregados normales;</li> <li>• Superficies asfálticas (pavimentos bituminosos que contienen el 10 % al 15 % de abrilladores artificiales);</li> <li>• Hormigón bituminoso grueso y rugoso, rico en gravas (más del 60 %) de tamaños mayores a 10 mm;</li> <li>• Asfalto mástico después de ser tratado. Se conoce también como asfalto mástico en estado nuevo.</li> </ul>

<sup>5</sup> No requerido

<sup>6</sup> Rocas de magma solidificado

<b>R3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revestimiento en Hormigón (asfalto frío, asfalto cemento) con tamaño de grava superior a 10 mm, con textura rugosa;</li> <li>• Superficies tratadas con textura rugosa pero pulimentada.</li> </ul>
<b>R4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asfalto mástico después de varios meses de uso;</li> <li>• Superficies con textura bastante suave o pulimentada.</li> </ul>

Los valores mínimos de iluminancia se establecen en base a la clase de iluminación (M3 a M5) y a la clase de superficie de la vía (R1 a R4). Solo se podrán hacer diseños con base en este criterio para las vías tipo M3, M4 y M5, como se muestra en la Tabla 1.4, mientras que para las vías tipo M1 y M2 solo se podrán realizar diseños en base al criterio de luminancia usando los valores de la Tabla 1.2.

**Tabla 1.4.** Valores mínimos de iluminancia promedio en vías motorizadas [13]

Clase de Iluminación	Valor promedio (mínimo a mantener) de iluminancia según tipo de superficie de la vía (lx) (ver Tabla 1.3)			Uniformidad de la Iluminancia
	R1	R2 y R3	R4	$E_{min}/E_{prom}$ (%)
<b>M3</b>	12	17	15	34 %
<b>M4</b>	8	12	10	25 %
<b>M5</b>	6	9	8	18 %

### Vías para tráfico peatonal

En el caso de vías para tráfico peatonal se clasifican de acuerdo a la siguiente tabla.

**Tabla 1.5.** Clases de iluminación para vías peatonales y de ciclistas [13]

Clase de Iluminación	Descripción del uso de la calzada
<b>P1</b>	Vías de gran importancia.
<b>P2</b>	Utilización nocturna intensa por peatones y ciclistas.
<b>P3</b>	Utilización nocturna moderada por peatones y ciclistas.
<b>P4</b>	Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes.
<b>P5</b>	Utilización nocturna baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. Importante mantener el lugar o el carácter arquitectónico del entorno.
<b>P6</b>	Utilización nocturna muy baja por peatones y ciclistas, únicamente asociada a las propiedades adyacentes. Importante preservar el carácter arquitectónico del ambiente.

**Tabla 1.6.** Requisitos mínimos de iluminación para tráfico peatonal [13]

Clase de Iluminación	Iluminación (lx)	
	Valor promedio <sup>*7</sup>	Valor mínimo*
P1	20	7,5
P2	10	3,0
P3	7,5	1,5
P4	5,0	1,0
P5	3,0	0,6
P6	1,5	0,2

### 1.3.2.2 Fuentes artificiales de luz

Las fuentes artificiales emplean instrumentos diseñados por el hombre para generar luz y a diferencia de las fuentes naturales como el sol la base de su funcionamiento es la electricidad.

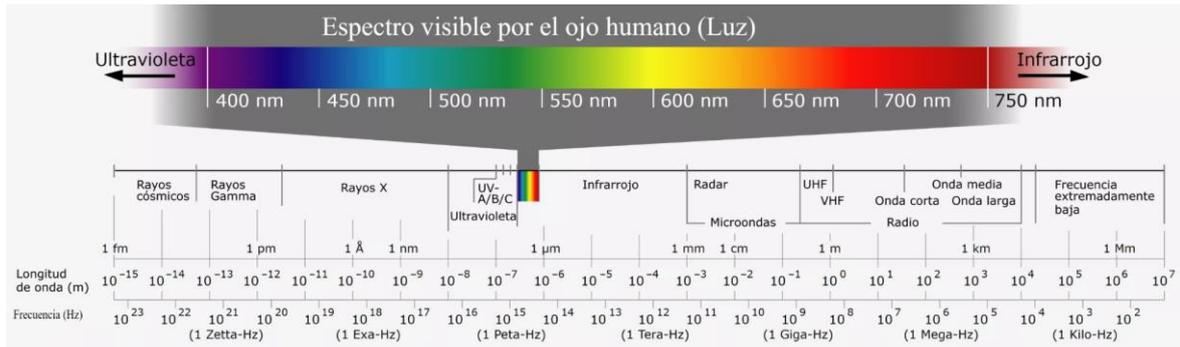
Desde el trabajo de Ohm publicado en 1827 y Joule en 1841 se sabía que cables conductores se calentaban con el paso de la corriente eléctrica en un grado que aumentaba con su resistividad. Por ende, los primeros trabajos dedicados a la producción de luz se basaron en la incandescencia de un metal en conductores con alta temperatura de fusión y alta resistividad [16].

La primera fuente artificial de luz fue la bombilla incandescente, en 1879 Thomas Alva Edison tras varios experimentos fallidos consiguió encender una bombilla incandescente durante 48 horas mostrando por primera vez ante el público una lámpara eléctrica, en 1881 junto a Joseph Wilson Swan fundaron la compañía Edison and Swan United Electric Light Company Limited a la cual se le atribuye la mejora de la bombilla con elementos que aumentaron su durabilidad y marcaron el comienzo de la fabricación masiva [17].

Las lámparas son fuentes artificiales que producen luz en base a elementos encargados de transformar la energía eléctrica en energía lumínica, estas fuentes de luz deben ser capaces de emitir radiaciones dentro del espectro visible de longitud de onda entre 380-780 nm (ver Figura 1.5), estos límites representan promedios obtenidos experimentalmente y en la realidad pueden variar de un individuo a otro [15].

---

<sup>7</sup> \* Medidas a nivel de suelo



**Figura 1.5** Espectro electromagnético [18]

De acuerdo a los tipos de tecnología empleada por las lámparas se las puede clasificar en: lámparas incandescentes, lámparas de descarga, lámparas de inducción y LED.

Debido a la baja eficacia de las lámparas incandescentes ( $< 15 \text{ lm/W}$ ), a partir del 1 de Septiembre del 2009 la Unión Europea (EU) empezó el fin de la fabricación e importación de las bombillas incandescentes logrando su completa desaparición del mercado en el año 2012 cerrando con esto un proceso cuya finalidad fue mejorar la eficiencia energética [19], es por esto que a continuación el análisis se centrará en lámparas de descarga de vapor de sodio de alta presión y LED que son las tecnologías de interés en este estudio.

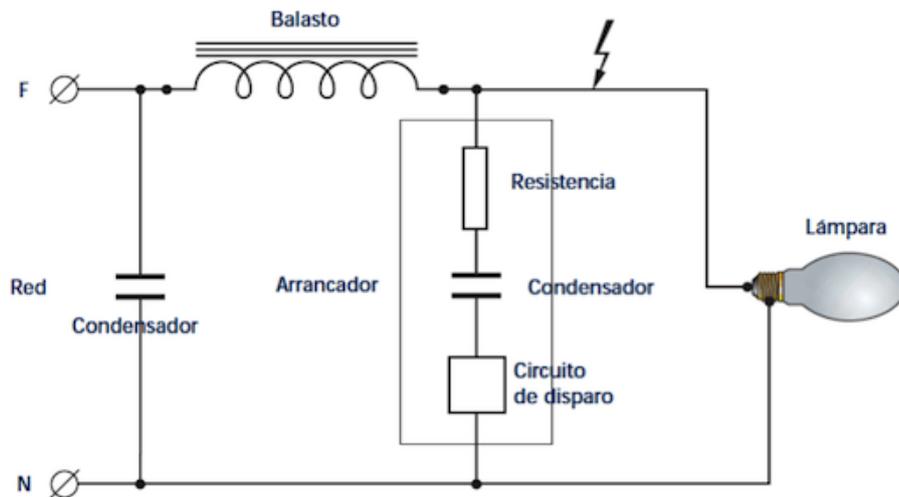
### **1.3.2.2.1 Lámparas de descarga**

Las lámparas de descarga consiguen emitir luz por medio de la excitación de un gas dentro de un tubo de descarga. Cuando un gas contiene cargas libres, la corriente eléctrica circula produciendo una diferencia de potencial entre los dos electrodos situados en los extremos. Las cargas libres atraídas por uno de los electrodos se aceleran debido al campo eléctrico aumentando así su energía cinética y pudiendo colisionar con los átomos del gas, si hay suficiente energía en el choque puede ionizarse un átomo inicialmente neutro, o por efectos del campo, el mismo átomo puede crear iones libres, como resultado la corriente tiende a una intensidad cada vez mayor [15], es por esto que es necesario limitarla y estabilizarla a un determinado valor por medio de un elemento auxiliar.

Las lámparas de descarga cuentan con varios elementos auxiliares necesarios para su funcionamiento como se muestra en el circuito de conexión de la Figura 1.6, los principales son [19] :

- El arrancador o ignitor permite romper la resistencia inicial del gas a la corriente eléctrica suministrando un breve pico de voltaje entre los electrodos del tubo necesario para iniciar la descarga.

- El balasto es el elemento auxiliar encargado de limitar la corriente que circula por la lámpara y evitar que el valor de la corriente aumente lo que provocaría la destrucción de la lámpara.
- Los condensadores o capacitores son los encargados de corregir el factor de potencia de las lámparas a valores permitidos por normas y regulaciones.

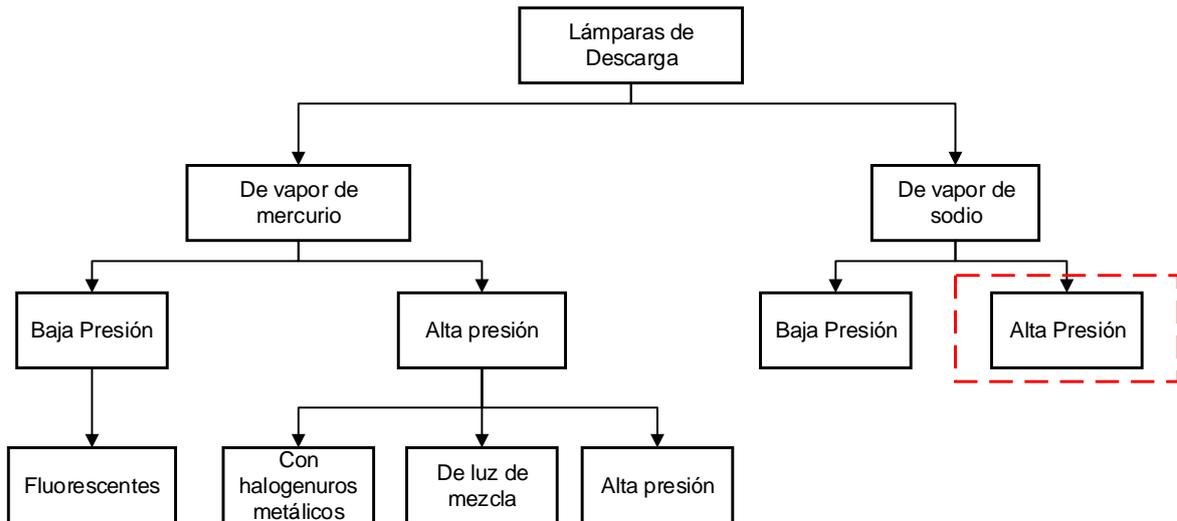


**Figura 1.6** Circuito de conexión lámpara de descarga con arrancador en paralelo [20]

Las pérdidas en este tipo de lámparas se producen por calor y por las radiaciones no visibles (infrarrojo y ultravioleta) producidas cuando el átomo pierde excitación al colisionar con otros átomos o al cambiar de un estado de energía superior a uno inferior, el porcentaje de pérdidas de cada tipo dependerán de la clase de lámpara que se emplee.

La luz emitida por este tipo de lámparas no es blanca por lo que la capacidad de reproducir los colores de estas fuentes de luz, es en general, peor que las lámparas incandescentes. Sin embargo recubriendo el tubo con sustancias fluorescentes es posible mejorar la reproducción del color y aumentar la eficacia de las lámparas [19].

De acuerdo al gas contenido en la lámpara y su presión se pueden clasificar las lámparas de descarga de la siguiente forma:



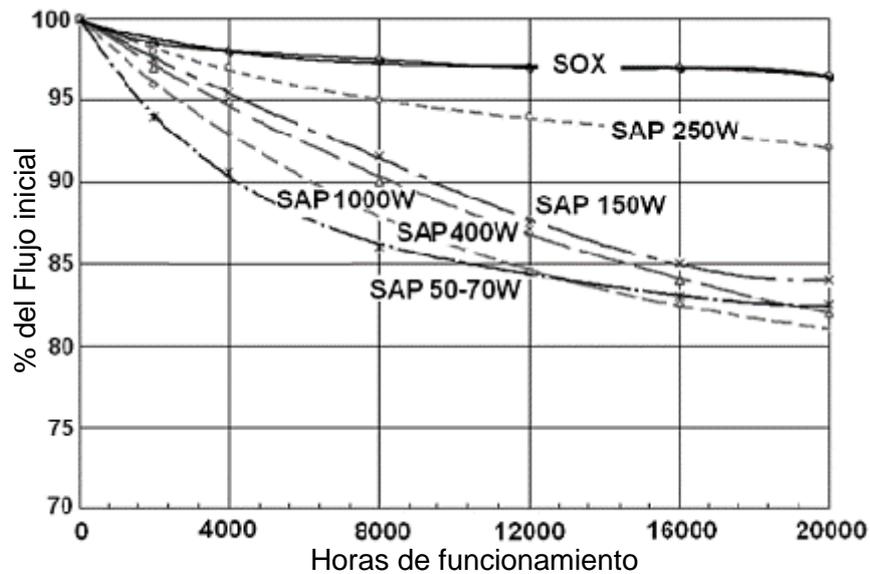
**Figura 1.7** Clasificación lámparas de descarga [Elaboración propia]

Las lámparas de interés en este estudio son las lámparas de vapor de sodio de alta presión (SAP), estas lámparas tienen una eficacia alta entre los 130 lm/W y una vida media de alrededor de 32 000 horas. Su índice de reproducción de color (CRI) es bajo (< 50 %) con una temperatura de color de alrededor de 2 400 K [15], por lo que se emplean para alumbrado exterior como el alumbrado público de vías, autopistas, túneles, etc. En el país son ampliamente usadas en el sistema de alumbrado público de las redes de distribución.

El tubo de descarga de estas lámparas contiene una mezcla de sodio-mercurio que se usa como gas amortiguador y xenón a baja presión para facilitar el encendido y reducir las pérdidas térmicas. Como el vidrio y el cuarzo no resisten la corrosión tan fuerte del vapor de sodio, el tubo de descarga está hecho de alúmina<sup>8</sup> transparente, la cubierta exterior del tubo puede ser ovoide y difuso, o claro y cilíndrico [21].

La duración de estas lámparas se ve afectada por la depreciación del flujo (ver Figura 1.8) que se produce por el deterioro de los electrodos debido a la evaporación del material de emisión y la acumulación de este material sobre las paredes del tubo de descarga, produciendo un oscurecimiento gradual del tubo de descarga. El deterioro y envejecimiento de los materiales que componen la lámpara también provocan una disminución de su vida útil.

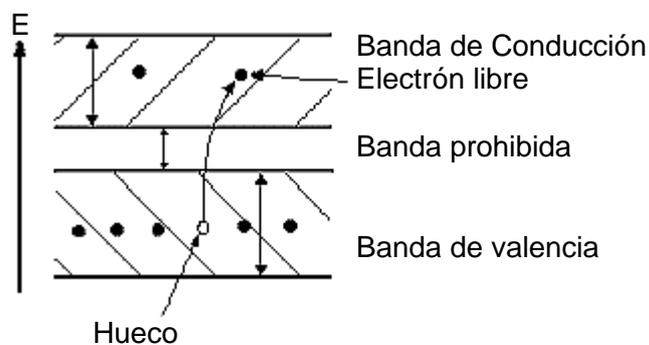
<sup>8</sup> Óxido de aluminio



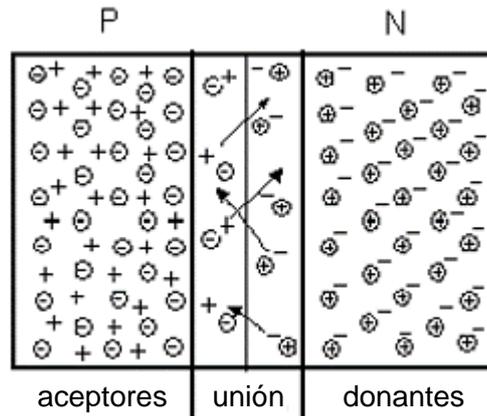
**Figura 1.8** Depreciación del flujo lámparas de sodio alta presión [22]

### 1.3.2.2 Lámparas LED

La tecnología LED (Diodo emisor de luz) es la tecnología creciente en el campo de fuentes artificiales de luz. Un diodo emisor de luz es un semiconductor de unión “p-n”, que emite luz cuando se activa. Los semiconductores de acuerdo a la teoría de bandas presentan una región de energía o banda prohibida relativamente pequeña (ver Figura 1.9), los electrones que se encuentran en la banda de valencia pueden adquirir suficiente energía para saltar a la banda de conducción, dejando un espacio libre o hueco en la banda de valencia que en presencia de un campo eléctrico permitiría la movilización relativamente fácil de electrones. En el semiconductor “n” representa la concentración de electrones libres y “p” la concentración de huecos [23].



**Figura 1.9** Bandas de energía de un semiconductor [23]



**Figura 1.10** Unión tipo p y n [23]

El diodo emisor de luz desprende fotones al ser energizado por polarización directa con un voltaje de corriente continua (DC) en sus terminales tal que el polo positivo llegue al ánodo y el polo negativo al cátodo del diodo, este efecto se conoce como electroluminiscencia, dependiendo de la energía o intervalo de banda de energía del semiconductor se percibirán diferentes colores de luz [4]. Los primeros LED de luz visible fueron de baja intensidad y se limitaron al rojo, los LED modernos están disponibles en longitudes de onda visibles, ultravioleta e infrarroja.

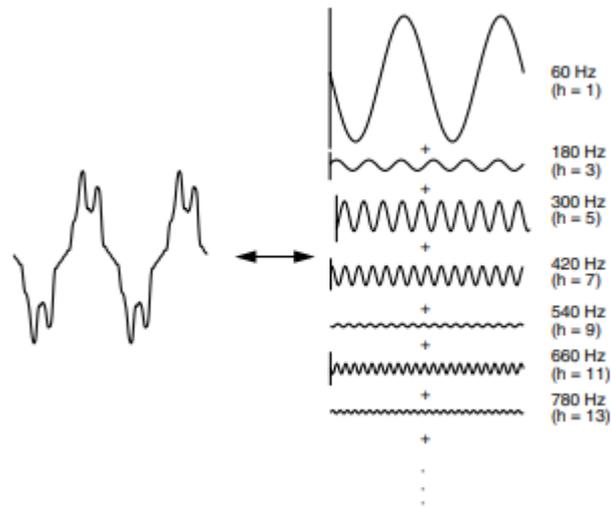
Al igual que las lámparas de descarga, los diodos LED empleados para iluminación necesitan de elementos auxiliares para su funcionamiento siendo el principal el denominado Driver.

El driver es el elemento auxiliar encargado de cumplir las siguientes funciones [24]:

- La primera es convertir el voltaje AC de la red en un voltaje de corriente continua DC de menor magnitud.
- La segunda regular el flujo de corriente continua que circula por el LED.
- Adicionalmente cumplen la función de asegurar que el factor de potencia y la distorsión armónica total de corriente (THDI) se encuentren dentro de los límites permisibles establecidos en normas.

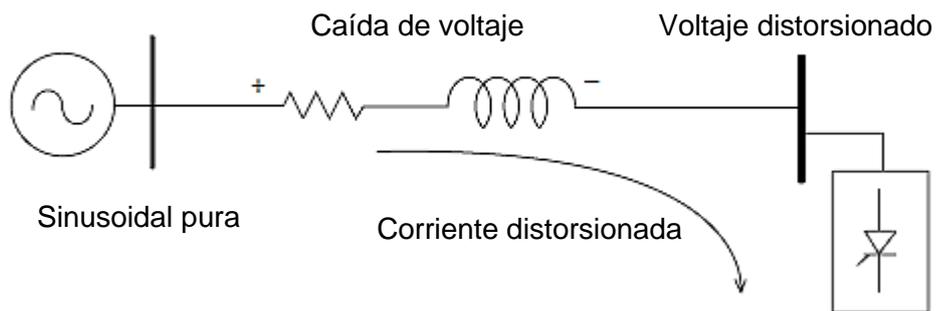
### 1.3.3 ARMÓNICOS

Los armónicos son ondas sinusoidales de frecuencia igual a un múltiplo entero de la fundamental que se adicionan o superponen a la principal, deformándola.



**Figura 1.11** Onda sinusoidal fundamental más componentes armónicos [25]

Se originan principalmente por las características no lineales de equipos o cargas conectadas al sistema eléctrico de potencia (SEP) que consumen corrientes no lineales, generando a su vez voltajes no lineales en los nodos de conexión.



**Figura 1.12** Circuito Equivalente de una carga no lineal en el SEP [25]

Dentro de los efectos negativos que las perturbaciones armónicas tienen en la red eléctrica se encuentran los siguientes:

- Aumento de pérdidas en transformadores
- Calentamiento en los bobinados de los transformadores
- Vibraciones mecánicas en máquinas rotativas

- Pérdidas en máquinas rotativas
- Aumento del ruido audible en máquinas
- Calentamiento del conductor neutro
- Disparo inapropiado de protecciones (relés, interruptores)

Para comprender los efectos que los armónicos pueden tener en los sistemas eléctricos es necesario definir los siguientes conceptos:

### **Frecuencia armónica ( $f_n$ )**

Es la frecuencia múltiplo entero de la frecuencia de la red de suministro o frecuencia fundamental ( $f_1 = 60$  Hz, en Ecuador).

$$f_n = n \times f_1 \text{ [Hz]} \quad (1.7)$$

### **Orden de un armónico (n, h)**

Es la relación entre una frecuencia armónica y la frecuencia fundamental o de la red de suministro expresada en número entero [26].

$$n = f_n / f_1 \quad (1.8)$$

### **Factor de distorsión armónica total (THD)**

Es la relación entre el valor eficaz de la suma de todas las componentes armónicas ( $G_n$ ) hasta un orden definido  $h$  y el valor eficaz de la componente fundamental ( $G_1$ ) [26].

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^h \left(\frac{G_n}{G_1}\right)^2} \quad (1.9)$$

El símbolo  $G$  representa el valor eficaz de la componente armónica, para el cálculo de la distorsión armónica total de corriente ( $I$ ) puede sustituirse  $G$  por  $I$  y para el cálculo de la distorsión armónica total de voltaje ( $V$ ) puede sustituirse  $G$  por  $V$ .

### **Factor de distorsión total de demanda (TDD)**

Es la razón del valor eficaz de todas las componentes armónicas hasta el orden definido excluyendo interarmónicos<sup>9</sup>, expresado en porcentaje de la componente fundamental de la corriente de demanda máxima [27].

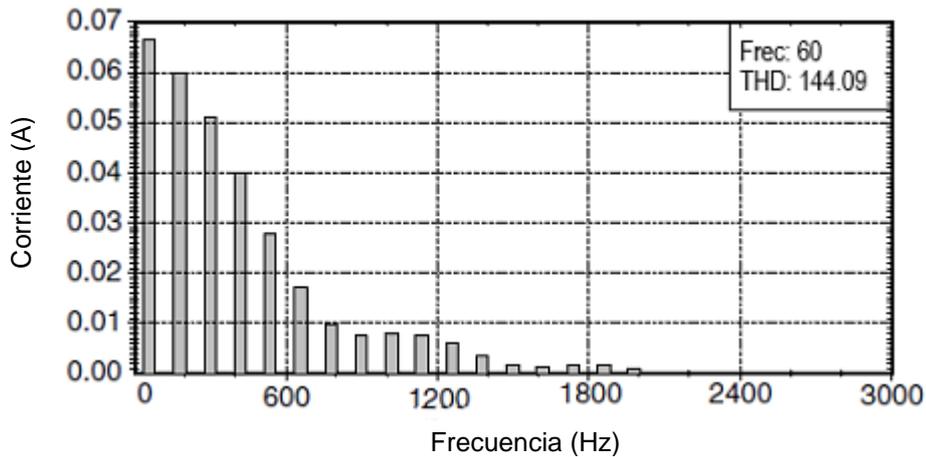
$$TDD = \sqrt{\sum_{n=2}^h \left(\frac{I_n}{I_D}\right)^2} \quad (1.10)$$

---

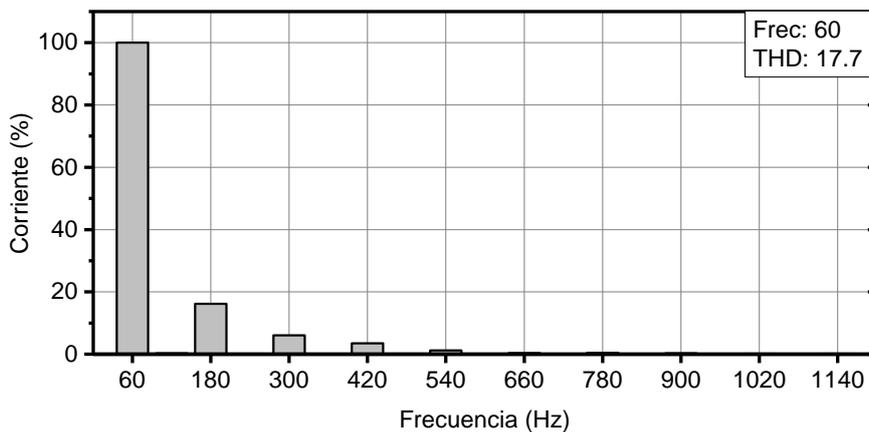
<sup>9</sup> Componente de frecuencia que no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental o de suministro

### 1.3.3.1 Armónicos producidos por equipos de iluminación con tecnología de Descarga en Gas

En lámparas de descarga uno de los elementos clave en la producción de componentes armónicos es el balasto. Los balastos pueden ser de tipo electrónico o electromagnético. Para el caso de luminarias de alumbrado público con lámparas de descarga de altas potencias se emplean balastos electromagnéticos.



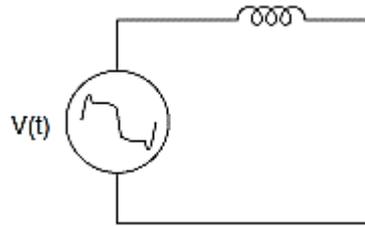
**Figura 1.13** Espectro armónico de corriente con un balasto electrónico de alta distorsión armónica [25]



**Figura 1.14** Espectro armónico de corriente con un balasto electromagnético [Elaboración propia]

Los balastos electromagnéticos tienen bajos niveles de distorsión armónica, en estos los armónicos son causados por la no linealidad del arco de la lámpara en serie con el balasto [28].

Los dispositivos de arco pueden ser representados básicamente por una fuente de voltaje en serie con una reactancia que limita la corriente a un valor razonable como se muestra en la Figura 1.15.



**Figura 1.15** Circuito equivalente para dispositivos de arco [25]

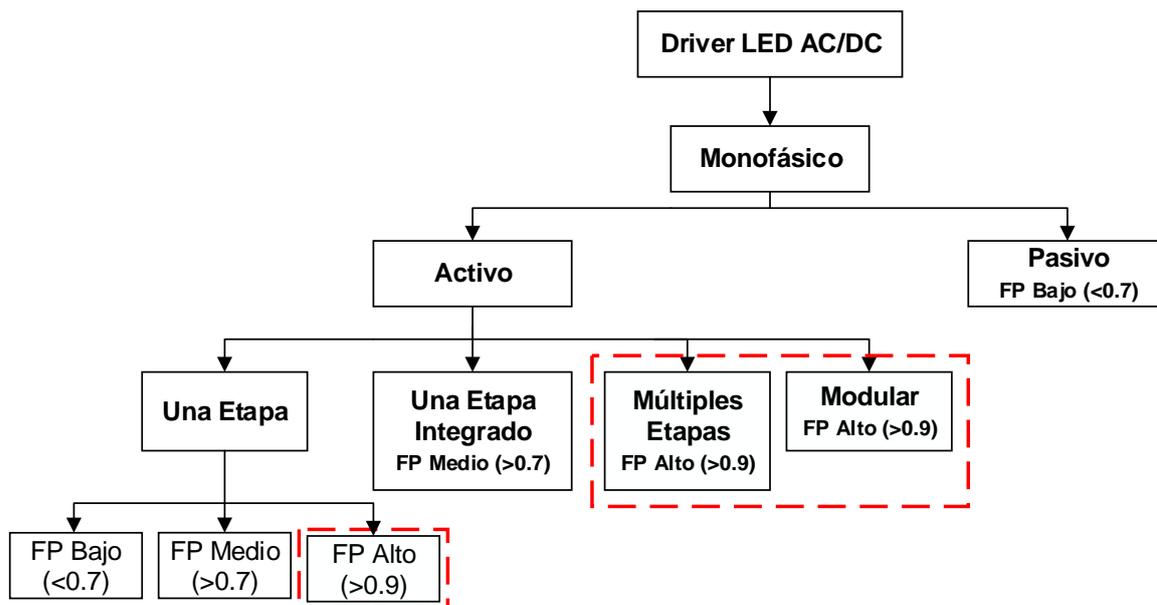
Los arcos eléctricos tienen características de voltaje y corriente no lineales. Después del encendido por arco, el voltaje disminuye a medida que la corriente de arco aumenta.

El arco eléctrico se representa mejor como fuente de voltaje armónica. Si se colocara una sonda directamente a través del arco, se podría observar una forma de onda algo trapezoidal. Su magnitud es en gran parte una función de la longitud del arco. Sin embargo, la impedancia de los balastos actúa como un amortiguador para que el voltaje de suministro sea solo moderadamente distorsionado. Por lo tanto, el dispositivo de arco puede ser una fuente de corriente armónica relativamente estable, que es adecuada para la mayoría de los análisis. La excepción ocurre cuando el sistema está cerca de la resonancia y un equivalente de Thevenin que utiliza la forma de onda de voltaje de arco proporciona respuestas más realistas [25].

### **1.3.3.2 Armónicos producidos por equipos de iluminación con tecnología LED**

En las lámparas y luminarias LED los armónicos se producen en el Driver. El Driver de los LED está compuesto por varios elementos pasivos, activos y semiconductores.

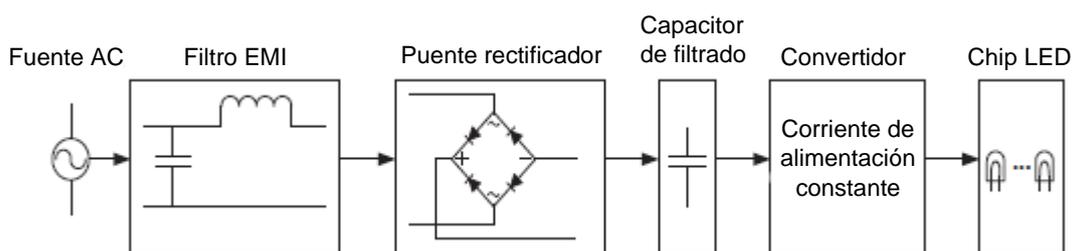
Los drivers LED pueden ser de tipo monofásico o trifásico, los drivers trifásicos son empleados para altas potencias ( $> 300$  W), mientras que los drivers monofásicos pueden ser empleados para lámparas ( $< 25$  W) y luminarias ( $> 25$  W), las luminarias LED para alumbrado público se conectan a la red secundaria de distribución a 220 V / 240 V, por lo cual se analizarán las configuraciones de drivers monofásicos. De acuerdo a su configuración los drivers monofásicos se pueden clasificar de la siguiente manera [29]:



**Figura 1.16** Clasificación de Drivers LED monofásicos [Elaboración propia]

Los drivers monofásicos pasivos son más propensos a ser empleados en lámparas LED con potencias  $< 25\text{ W}$  mientras que los drivers monofásicos activos se emplean tanto para bajas potencias como para potencias  $> 25\text{ W}$  [29]. Las luminarias LED de acuerdo con la norma IEC 61000-3-2 [30] pertenecen al equipo de iluminación Clase C con potencia activa mayor a  $25\text{ W}$ , este tipo de equipo debe emitir componentes armónicos muy bajos, lo que implica una corriente de entrada prácticamente sinusoidal y en fase con el voltaje de entrada. Esto significa un factor de potencia muy cercano a uno, por lo cual, para el caso de luminarias LED las configuraciones de Drivers que se deben emplear son aquellas con un factor de potencia (FP) alto como se observa en la Figura 1.16.

El funcionamiento del driver LED AC/DC se puede resumir en la Figura 1.17. El bloque denominado filtro EMI de interferencia electromagnética cumple la función de proteger a la red de corriente alterna AC reduciendo el paso de los componentes armónicos. El puente rectificador se encarga de convertir el voltaje alterno en un voltaje continuo mientras que el convertidor DC/DC o convertidor es el encargado de regular la corriente de alimentación para los arreglos de LEDs, contenidos en el Chip LED.



**Figura 1.17** Diagrama de bloques resumido de un Driver LED [31]

Los componentes armónicos se generan en el convertidor de potencia debido a la conmutación de semiconductores controlados. En los convertidores, los armónicos de corriente que se producen dependen del tipo de conversor y operación que realizan.

Las configuraciones básicas de conversores estáticos generan un alto contenido armónico (THDI > 30 %) y un pobre factor de potencia (FP < 0,7), en los últimos años se han desarrollado nuevas configuraciones de convertidores que reducen notablemente la distorsión en la corriente, haciendo que esta sea prácticamente sinusoidal.

Algunos tipos de convertidores de baja distorsión armónica son [32]:

No aislados

- Buck (reductor)
- Boost (elevador)
- Buck-boost (reductor-elevador)

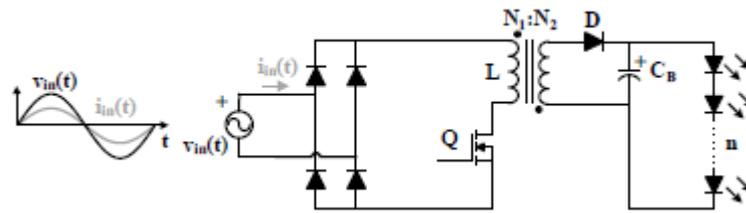
Aislados

- Flyback (retorno)
- Forward

En los convertidores aislados se emplea comúnmente un transformador que proporciona aislamiento galvánico, como medida de protección para el circuito de LEDs o Chip LED.

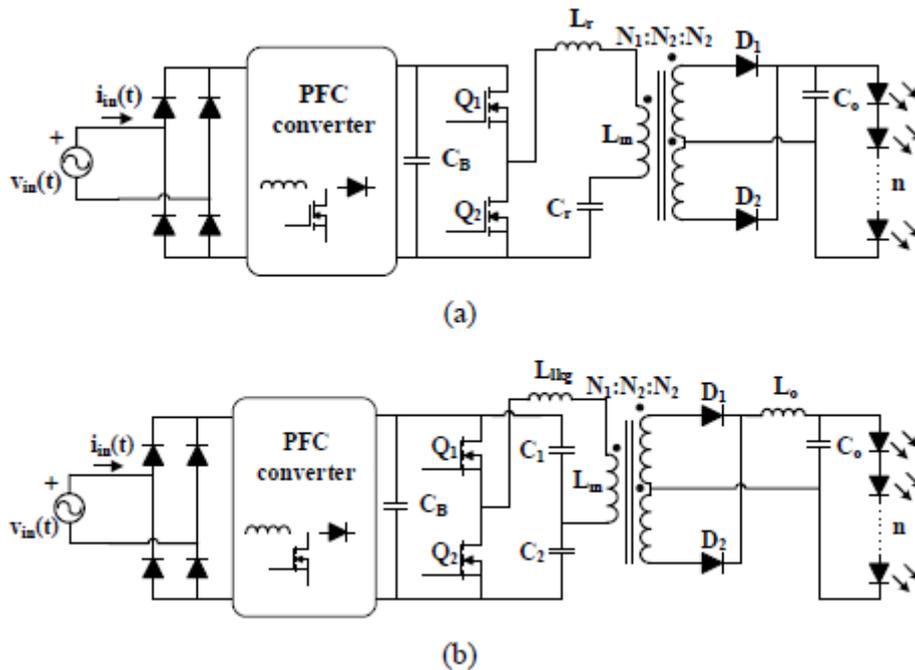
El tipo de configuración empleada con mayor frecuencia es el convertidor Flyback, este tipo de configuración aislada es la preferida para aplicaciones de baja potencia (1 W-100 W), y gracias a la mejora de las propiedades magnéticas de los núcleos de los transformadores de alta frecuencia se han logrado emplear para potencias de hasta 1 000 W [32], por lo cual se ha convertido en la configuración más usada en convertidores monofásicos tanto para lámparas como luminarias LED [29].

Un convertidor Flyback (Figura 1.18), es un convertidor activo de una sola etapa perteneciente a la familia Buck-boost que incluye aislamiento galvánico gracias a su inductor acoplado. Al ser miembro de la familia Buck-boost, es capaz de lograr un factor de potencia cercano a la unidad y una corrección de forma natural del factor de potencia al trabajar en el modo de conducción discontinua (MCD), lo que simplifica su control; como desventaja presenta baja eficiencia debido a que necesita un filtro snubber (amortiguador pasivo) usado para proteger al convertidor de picos de voltaje [29].



**Figura 1.18** Convertidor Flyback en driver de una sola etapa [29]

En el caso de los drivers monofásicos activos de múltiples etapas, las configuraciones preferidas son: el convertidor resonante LLC que puede encontrarse en su configuración de puente medio (Half bridge) o de puente completo (Full-Bridge) y el puente medio asimétrico (Asymmetrical Half-Bridge AHB)



**Figura 1.19** Configuraciones multi-etapa. (a) Half-bridge resonant LLC. (b) Asymmetrical Half-Bridge (AHB) [29]

La conmutación de los semiconductores Q de los convertidores activos analizados puede ser controlada por diferentes esquemas de conmutación, el objetivo de todos estos esquemas es eliminar o minimizar los armónicos de orden bajo presentes en la onda de salida.

Los esquemas de conmutación más empleados son los PWM (pulse-width modulation) modulación por ancho de pulso y SPWM modulación de ancho de pulso sinusoidal. Al incrementar el número de pulsos la componente armónica dominante de la corriente de

línea de entrada es desplazada hacia frecuencias de orden alto reduciendo el factor de distorsión de la corriente. Un factor de distorsión ( $FD$ ) óptimo puede ser obtenido variando el ancho y número de los pulsos ( $N_p$ ) como se observa en la Figura 1.20, donde  $FD$  se calcula de acuerdo a la Ecuación 1.11. Teóricamente podrían ser requeridos un infinito número de pulsos para reducir a un valor cercano a cero el factor de distorsión, sin embargo, en la práctica el número de pulsos es limitado por factores de pérdidas en la conmutación [33].

$$FD = \sqrt{\sum_{n=2}^h \left(\frac{G_n/n^2}{G_1}\right)^2} \quad (1.11)$$

Donde:

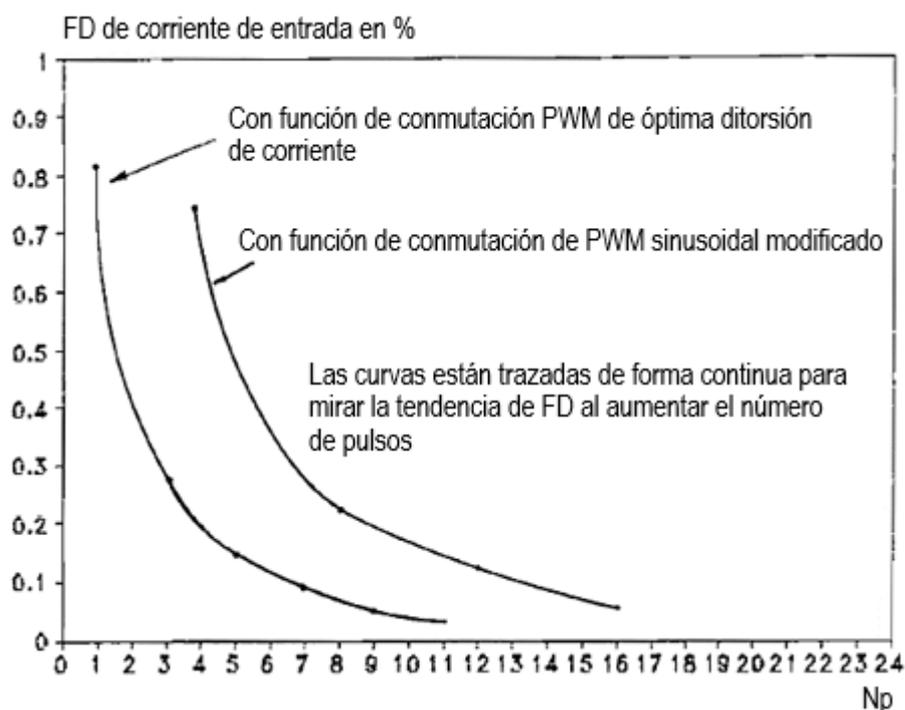
$n$ : orden armónico (número entero)

$G_n$ : valor eficaz de la componente armónica

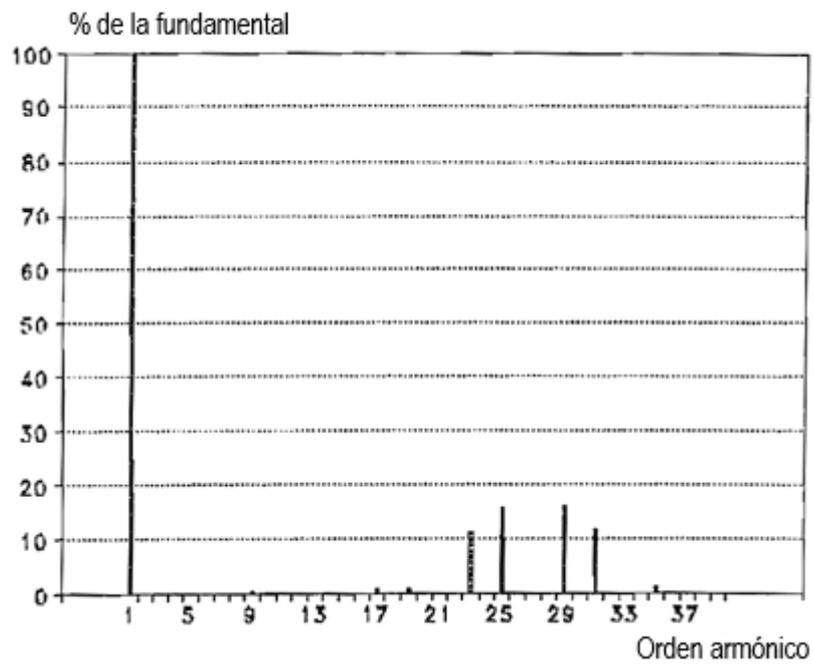
$G_1$ : valor eficaz de la componente armónica fundamental a 60 Hz

$h$ : orden del mayor armónico que se toma en cuenta (p. ej. 50)

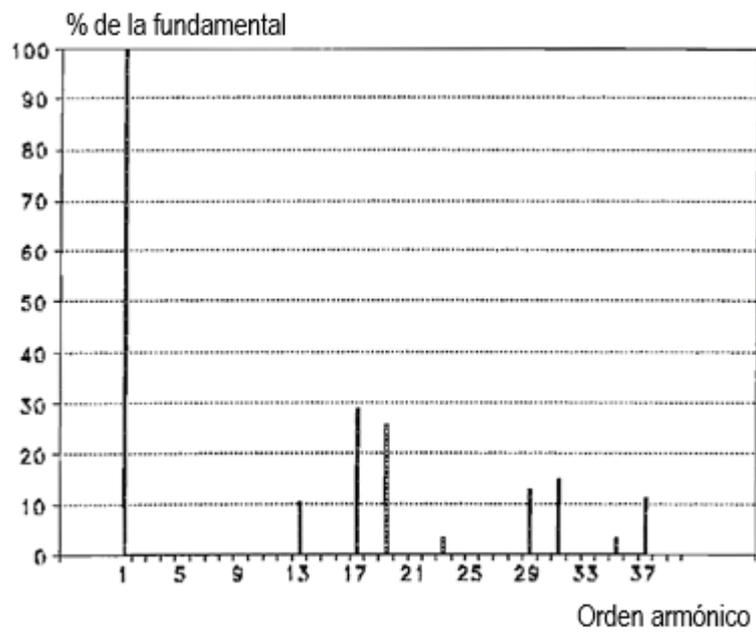
De acuerdo a lo descrito existen algunas funciones de conmutación que producen una óptima distorsión en la corriente de entrada del convertidor, algunas incluso son capaces de eliminar componentes armónicas específicas de la corriente de línea de entrada, en donde para obtener un factor de distorsión lo más bajo posible son eliminados los componentes armónicos de menor orden [33].



**Figura 1.20** Factor de distorsión de corriente vs. número de pulsos [33]



**Figura 1.21** Espectro de frecuencia de la función de conmutación PWM sinusoidal [33]



**Figura 1.22** Espectro de frecuencia de la función de conmutación con eliminación armónica específica [33]

### **1.3.3.3 Normativa**

#### **1.3.3.3.1 Medición de armónicos**

Las normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30 establecen los requisitos generales para la medición de armónicos, así como las condiciones y técnicas que se deben seguir en los ensayos de medición de armónicos.

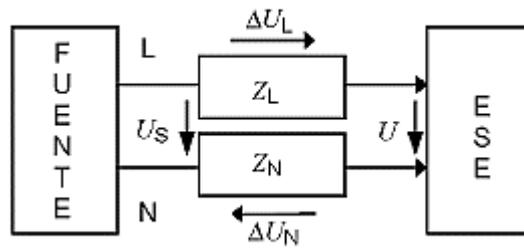
#### **IEC 61000-4-30**

La norma IEC 61000-4-30 o su versión en español *UNE-EN 61000-4-30: Técnicas de ensayo y medida. Métodos de medida de la calidad de suministro*, contiene las clases, requisitos, métodos de medida y la forma de interpretar resultados de todos los parámetros de calidad [34]. En lo que respecta a armónicos, la norma introduce a la norma IEC 61000-4-7 como la guía específica a utilizarse para la medición de armónicos de voltaje y de corriente.

#### **IEC 61000-4-7**

La norma IEC 61000-4-7 o su versión en español *UNE-EN 61000-4-7: Técnicas de ensayo y medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a estas*, define la instrumentación de medida para el ensayo de equipos individuales de acuerdo con los límites de emisión señalados en ciertas normas, así como para la medida de las corrientes y tensiones armónicas en las propias redes de suministro [26].

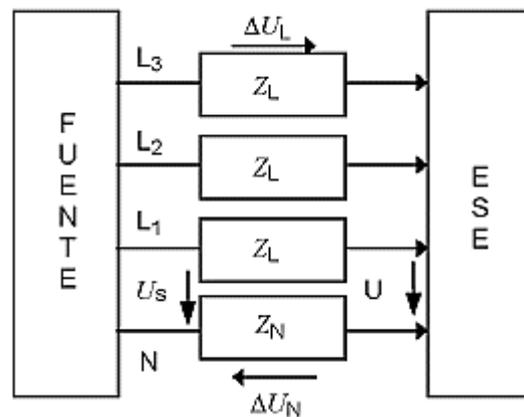
Para la evaluación de las emisiones de equipos individuales la norma establece la configuración de medida de emisiones tanto monofásicas como trifásicas.



Leyenda

- $U_S$  Tensión fase-neutro de la fuente
- $U$  Tensión en los terminales del ESE
- $Z_{LN}$  Impedancia del cableado y del captador de corriente
- ESE* Equipo sometido a ensayo
- $\Delta U$  Caída de tensión a través de  $Z_L$  y  $Z_N$  ( $\Delta U = \Delta U_L + \Delta U_N$ )
- $L$  Conexión a la fase
- $N$  Conexión al neutro

**Figura 1.23** Configuración para la medida de emisiones monofásicas [26]



Leyenda

- $U_S$  Tensión fase-neutro de la fuente
- $U$  Tensión en los terminales del ESE
- $Z_{LN}$  Impedancia del cableado y del captador de corriente
- ESE* Equipo sometido a ensayo
- $\Delta U$  Caída de tensión a través de  $Z_L$  y  $Z_N$  ( $\Delta U = \Delta U_L + \Delta U_N$ )  
Para la conexión entre fases,  $\Delta U = 2 \times \Delta U_L$
- $L_{1-3}$  Conexiones a las fases
- $N$  Conexión al neutro

**Figura 1.24** Configuración para la medida de emisiones trifásicas [26]

Además de la configuración de medida la norma establece que mientras se efectúan las medidas, el voltaje de ensayo  $U$  en los terminales del equipo sometido a ensayo (ESE) debe satisfacer los siguientes requisitos [26]:

- El voltaje de ensayo debe mantenerse dentro del  $\pm 2\%$  del valor seleccionado y la frecuencia debe mantenerse en el  $\pm 0,5\%$  del valor seleccionado.
- En un suministro trifásico, los voltajes de fases deben tener, respectivamente, una relación de fase de  $0^\circ; 120^\circ \pm 1,5^\circ; 240^\circ \pm 1,5^\circ$ .
- La distorsión armónica del voltaje de ensayo U del ESE no debe sobrepasar los siguientes valores:
  - 0,9 % para un armónico de orden 3
  - 0,4 % para un armónico de orden 5
  - 0,3 % para un armónico de orden 7
  - 0,2 % para un armónico de orden 9
  - 0,2 % para armónicos pares de orden comprendido entre el 2 y el 10
  - 0,1 % para armónicos de orden comprendido entre el 11 y el 40
- El valor de cresta del voltaje de ensayo debe estar dentro de un margen de 1,4 a 1,42 veces su valor eficaz y debe alcanzar un ángulo entre  $87^\circ$  y  $93^\circ$  después del paso por cero.
- La caída de voltaje  $\Delta U$  a través de la impedancia del captador de corriente y del cableado no debe exceder de un voltaje de cresta de 0,5 V.

### **IEEE Std 519**

El estándar IEEE Std 519 contiene las recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. Las recomendaciones de este estándar deben ser aplicadas en los puntos de interferencia entre los puntos de entrega del distribuidor y el consumidor en el SEP.

El equipo de medición empleado debe cumplir con las especificaciones de las normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30, por lo que las especificaciones detalladas en este estándar están en concordancia con las dos normas descritas con anterioridad.

### 1.3.3.3.2 Límites para las emisiones de corriente armónica de equipos

#### IEC 61000-3-2

La norma IEC 61000-3-2 o su versión en español *UNE-EN 61000-3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase)*, especifica los límites de las componentes armónicas de la corriente que pueden ser producidas por equipos ensayados bajo condiciones específicas [30].

De acuerdo a esta norma los equipos de iluminación pertenecen a los equipos Clase C, dentro de los cuales se distinguen dos categorías, aquellos con potencia activa de entrada  $> 25$  W y aquellos con potencia activa de entrada  $\leq 25$  W. Las luminarias al presentar potencias activas mayores a 25 W se encuentran dentro de la primera categoría.

Para equipos de iluminación con una potencia activa de entrada  $> 25$  W, las corrientes armónicas no deben sobrepasar los límites indicados en la Tabla 1.7.

**Tabla 1.7** Límites para equipos de Clase C [30]

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible expresada en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental (%)
2	2
3	$30 \times \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (Solo armónicos impares)	3

\*  $\lambda$  es el factor de potencia

### 1.3.3.3.3 Límites para la distorsión armónica de corriente en sistemas eléctricos

#### IEEE Std 519

Los límites recomendados en este estándar no aplican para piezas individuales o equipo individual como en el caso de la norma IEC 61000-3-2. Los límites de esta norma deben ser aplicados en el punto de acoplamiento común (PCC) entre el dueño del sistema u operador y el usuario o consumidor, donde el PCC es usualmente tomado como el punto en el SEP más cercano al usuario donde el sistema de distribución o el operador ofrecen el servicio a otros usuarios. Para el caso de usuarios industriales conectados a la red por medio de un transformador, el PCC está del lado de alto voltaje del transformador. Para usuarios comerciales conectados a la red por medio de un transformador común, el PCC se ubica del lado de bajo voltaje [27].

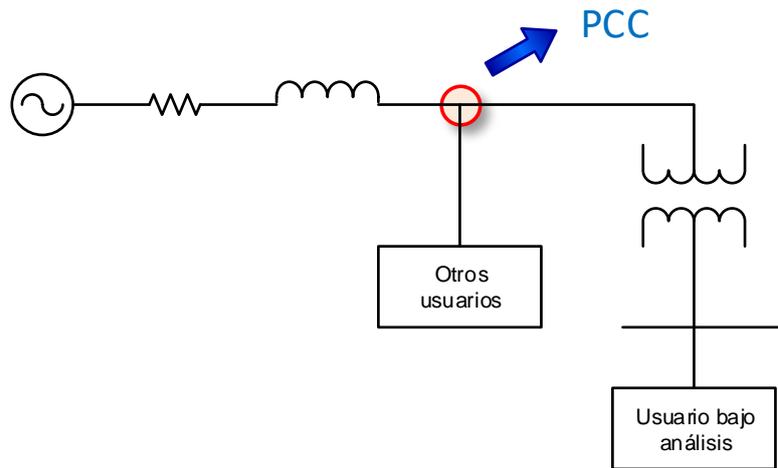


Figura 1.25 PCC para usuarios industriales [Elaboración propia]

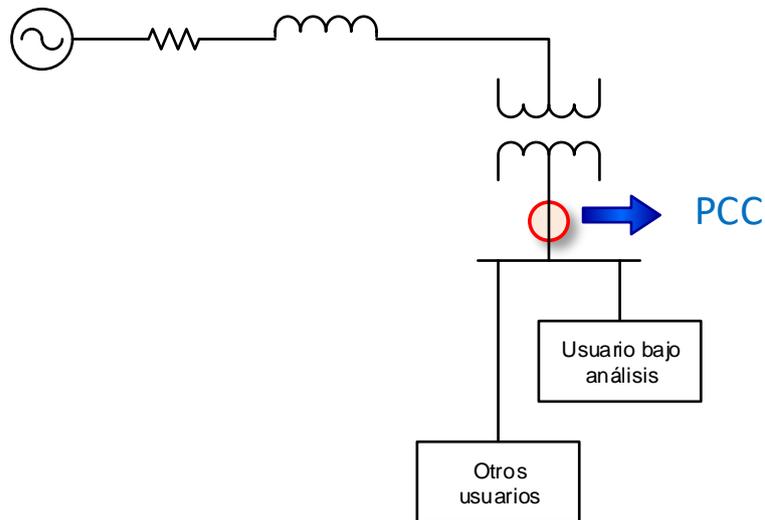


Figura 1.26 PCC para usuarios comerciales [Elaboración propia]

Tabla 1.8 Límites de distorsión de corriente para sistemas desde 120 V hasta 69 kV [27]

Distorsión armónica de corriente máxima en porcentaje de $I_L$						
Orden individual de armónicos (armónicos impares) <sup>a,b</sup>						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1\ 000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
$> 1\ 000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

<sup>a</sup> Los armónicos pares están limitados al 25 % del límite del armónico impar anterior

<sup>b</sup> Distorsiones armónicas de corriente que resultan en un offset DC, como por ejemplo convertidores de media onda no son permitidas

<sup>c</sup>  $I_{SC}$  = Corriente de corto circuito máxima en el PCC,  $I_L$  = Corriente de máxima demanda a la frecuencia fundamental en el PCC bajo condiciones normales de operación.

## Regulación No. ARCONEL-005/18

La Agencia de Regulación y Control de Electricidad del Ecuador (ARCONEL), en su regulación 005/18-Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, establece los indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, además define los procedimientos de medición, registro y evaluación a ser cumplidos por las empresas eléctricas de distribución y consumidores en el país [35].

En lo que respecta a los límites de distorsión armónica de corriente la regulación adopta los límites establecidos por la IEEE Std 519-2014, respecto a las mediciones de armónicos de corriente adopta los requerimientos de las normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30.

Los límites de distorsión armónica de corriente son los mismos que los de la Tabla 1.8, un incumplimiento de los límites será responsabilidad de los consumidores o usuarios bajo análisis, los cuales deberán realizar las acciones necesarias de corrección para solventar los incumplimientos [35].

### 1.3.3.3.4 Límites para la distorsión armónica de voltaje en sistemas eléctricos

#### IEEE Std 519

Los límites de esta norma al igual que los límites de distorsión armónica de corriente deben ser aplicados en el PCC, todos los valores deben estar expresados en porcentaje del voltaje en el PCC a la frecuencia fundamental.

**Tabla 1.9** Límites de distorsión armónica de voltaje [27]

Voltaje (V) en el PCC	Armónica individual (%)	Distorsión armónica total THD (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5*

\*Sistemas de alto voltaje pueden tener hasta un 2 % de THD donde la causa es un terminal de alto voltaje DC cuyos efectos se abran atenuado en los puntos de la red donde futuros usuarios pueden estar conectados.

## Regulación No. ARCONEL-005/18

La regulación 005/18 del ARCONEL adopta los límites del estándar IEEE Std 519 que se observan en la Tabla 1.9, el cumplimiento de estos límites será responsabilidad de la distribuidora. El período de evaluación debe ser de al menos siete días continuos en intervalos de 10 minutos.

**Tabla 1.10** Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [35]

<b>Nivel de voltaje</b>	<b>Armónica individual (%)</b>	<b>THD (%)</b>
Bajo voltaje	5,0	8,0
Medio voltaje	3,0	5,0
Alto voltaje (Grupo 1)	1,5	2,5
Alto voltaje (Grupo 2)	1,0	1,5

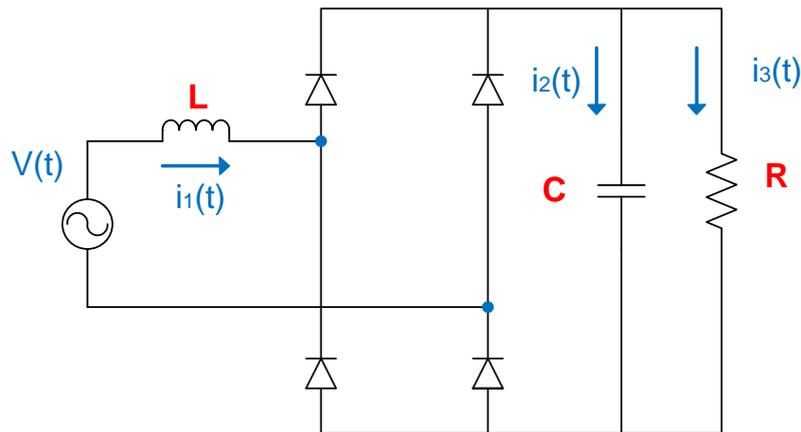
### 1.3.3.4 Flujo de Armónicos

Las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales distorsionan el voltaje en los nodos de conexión de las redes de distribución, por sí solas estas cargas monofásicas no lineales, como las luminarias LED y SAP no producen un THD de voltaje alto. Si bien el valor de THDI que se obtiene con una sola luminaria conectada, puede ser alto, al ser la carga y corriente bajas el efecto no es considerable. Sin embargo, al conectar varias de estas cargas a una misma red de distribución los armónicos resultantes pueden volverse significativos [36].

En los sistemas eléctricos de potencia las redes de distribución sirven a diferentes tipos de clientes y por ende diferentes tipos de cargas. Cuando en la red de distribución un mismo transformador o barra es el encargado de servir a distintos tipos de cargas no lineales (televisores, computadores, drivers LED, etc.) aparece un efecto de cancelación armónica de corriente debido a la diversidad del ángulo de fase del espectro armónico de cada carga no lineal. Por otro lado al conectar cargas del mismo tipo solo se analiza el efecto de atenuación, el cual ocurre debido a la impedancia propia del sistema y a su correspondiente distorsión de voltaje que tiende a reducir la corriente armónica total producida por las cargas no lineales [37]. En transformadores que sirven exclusivamente a cargas de iluminación para alumbrado público no se considera el efecto de diversidad pues se consideran N cargas conectadas idénticas del mismo nivel de potencia, pero si se considera el efecto de atenuación debido a las impedancias propias del transformador y de la red de conexión de alumbrado público, y sus correspondientes distorsiones de voltaje.

#### 1.3.3.4.1 Análisis en el dominio del tiempo

El dominio del tiempo permite analizar las señales de voltaje y corriente de un circuito eléctrico por medio de funciones o ecuaciones diferenciales las cuales representan su comportamiento dinámico, para esto es importante conocer el valor de ciertos parámetros básicos del equipo a modelar, ya sean inductancias ( $L$ ), capacitancias ( $C$ ), resistencias ( $R$ ), etc. Para un equipo generador de armónicos como un driver LED sería necesario modelar el rectificador de puente de diodos, más el convertidor, semiconductores y sus respectivos elementos para el control del factor de potencia, lo cual se vuelve una tarea compleja si se trata de modelar un driver comercial. La Figura 1.27 muestra el circuito de un rectificador de puente de diodos de onda completa y la Ecuación 1.12 su ecuación diferencial en el dominio del tiempo.



**Figura 1.27** Circuito de un rectificador de puente de diodos [Elaboración propia]

$$\frac{d}{dt} v(t) + \frac{1}{RC} v(t) = L \frac{d^2}{dt^2} i_1(t) + \frac{L}{RC} \frac{d}{dt} i_1(t) + \frac{1}{C} i_1(t) \quad (1.12)$$

Si bien los parámetros del modelo completo de un Driver LED podrían ser obtenidos por medio de funciones de transferencia, observando la entrada y salida del driver, no constituye el objetivo de este trabajo.

#### 1.3.3.4.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

El análisis en el dominio de la frecuencia permite modelar cargas armónicas aplicando el “Método de Inyección de Corriente”, en el cual, las cargas no lineales se representan como fuentes de corriente, el mismo que además caracteriza la respuesta de todos los elementos del sistema en función de la frecuencia [38].

El método más utilizado en programas de simulación es el flujo de potencia armónica el cual consiste en resolver múltiples sistemas de ecuaciones. A partir del modelo de red es

posible formar la matriz de admitancias  $Y_h$  de cada barra del sistema. Si una fuente de corriente armónica se conecta en una de las barras de la red, el voltaje armónico  $V_h$  de la barra estará relacionado con la matriz de admitancias y la corriente armónica  $I_h$  por medio de la siguiente ecuación [39]:

$$[Y_h] \cdot [V_h] = [I_h] \quad (1.13)$$

La simulación de cargas no lineales en el método de inyección de corriente se realiza por medio de fuentes de corriente fijas, considerando como supuesto el hecho de que la señal de voltaje no presenta distorsión, por lo que se excluye la interacción entre la carga y las variaciones de voltaje del sistema de distribución [12].

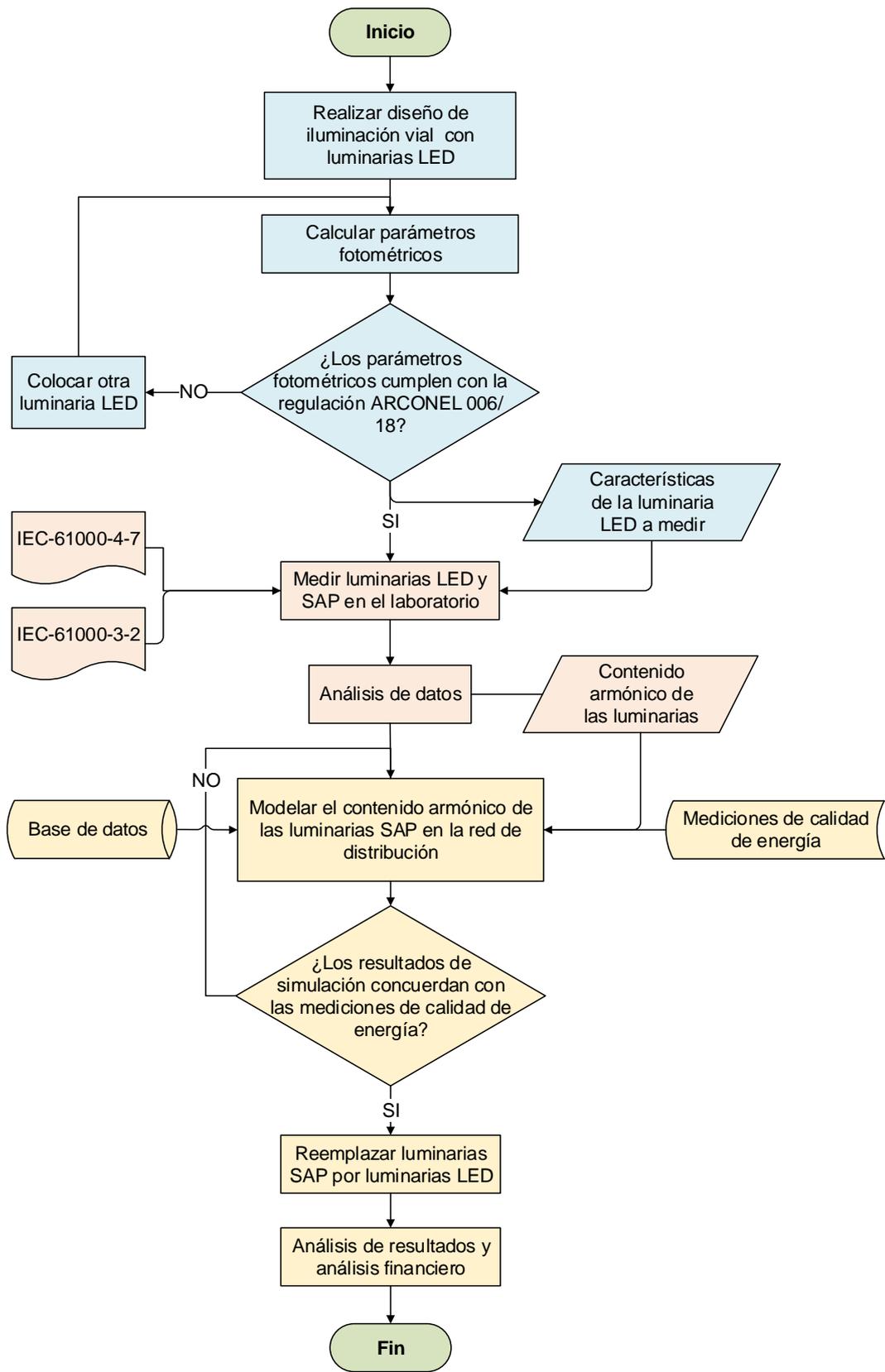
## 2. METODOLOGÍA

La metodología descrita en este capítulo se emplea para el análisis del contenido armónico de una red de alumbrado público antes y después del reemplazo de luminarias SAP por luminarias de tecnología LED.

La Figura 2.1 ilustra tres fases empleadas en la metodología, la primera es la fase de diseño en la cual se determina el tipo de luminaria LED que se podría instalar en reemplazo de las luminarias SAP, para esto se realiza un diseño de iluminación vial colocando luminarias LED de tal forma que se cumpla con los parámetros fotométricos que exige la regulación ARCONEL 006/18.

La segunda fase es la de medición en el laboratorio, en base a los resultados obtenidos en la fase de diseño de iluminación se mide el contenido armónico de una luminaria LED de las mismas características a las obtenidas en la fase 1 y una luminaria SAP correspondiente al tipo de luminaria instalada en la red de alumbrado público. Las mediciones se llevan a cabo de acuerdo a las normas para medición de armónicos IEC 61000-4-7 e IEC 61000-3-2. Terminado el proceso de medición se realiza un análisis de los datos obtenidos y como resultado se obtiene el espectro armónico de corriente y voltaje de cada luminaria.

Por último, la tercera fase consiste en modelar el contenido armónico de la red de distribución tanto con las luminarias LED como SAP, para esto se emplean los resultados obtenidos de medición en el laboratorio y datos de medición de contenido armónico en la red de distribución. Además, se analizan desde el punto de vista financiero los costos de inversión necesarios para efectuar el reemplazo de las luminarias y la viabilidad del proyecto.



**Figura 2.1** Diagrama de procesos de la metodología aplicada [Elaboración propia]

## 2.1. DISEÑO DE ILUMINACIÓN VIAL

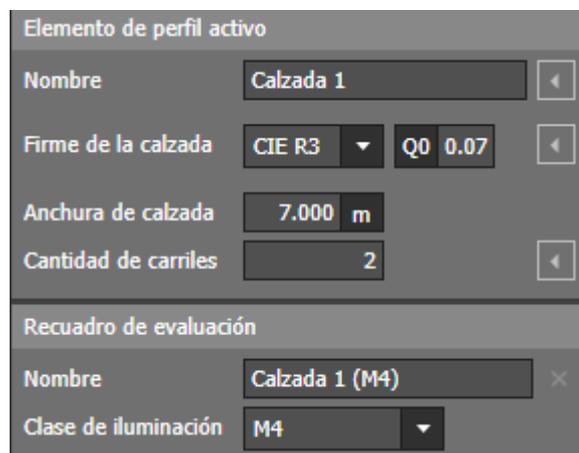
Para el diseño de iluminación vial se emplea un software de planificación que permita diseñar la iluminación en exteriores y calcular los parámetros fotométricos en la vía. El software DIALux permite realizar todas estas tareas y además cuenta con un módulo específico para iluminación de carreteras.

El proceso de planificación en DIALux se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Configurar las características de la vía
2. Seleccionar el tipo de luminarias
3. Configurar disposición de las luminarias
4. Optimizar variables
5. Documentar el proyecto

### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA VÍA

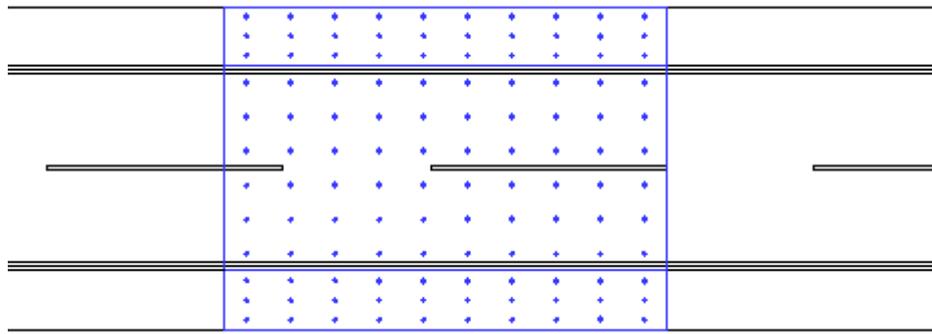
Las características de la vía se colocan de acuerdo a la información de la Tabla 1.1 y Tabla 1.3, en base a las cuales se determina el tipo de iluminación y la clase de la calzada.



The image shows a screenshot of the DIALux software interface for configuring road characteristics. It is divided into two main sections: 'Elemento de perfil activo' and 'Recuadro de evaluación'.  
In the 'Elemento de perfil activo' section, the following parameters are set:  
- Nombre: Calzada 1  
- Firme de la calzada: CIE R3 (selected from a dropdown) and Q0 0.07  
- Anchura de calzada: 7.000 m  
- Cantidad de carriles: 2  
In the 'Recuadro de evaluación' section, the following parameters are set:  
- Nombre: Calzada 1 (M4)  
- Clase de iluminación: M4 (selected from a dropdown)

**Figura 2.2** Características de la calzada  
[Elaboración propia, obtenido de DIALux]

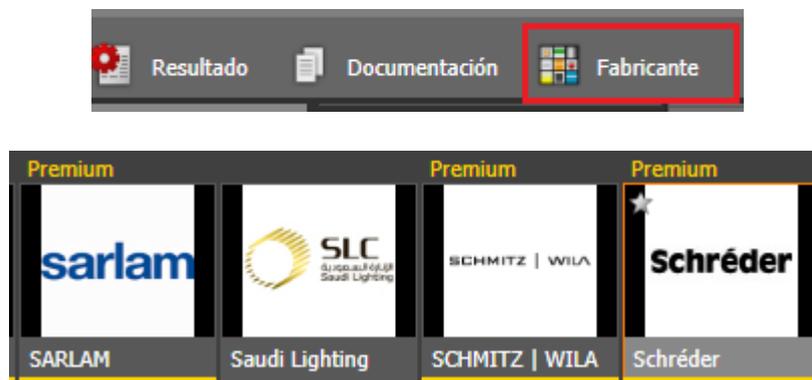
Se especifican también las dimensiones de cada calzada, aceras y caminos peatonales de la vía. DIALux asigna automáticamente un recuadro de evaluación para el cálculo de los parámetros fotométricos sobre las calzadas y aceras.



**Figura 2.3** Recuadro de evaluación en DIALux  
[Elaboración propia, obtenido de DIALux]

### 2.1.2 TIPO DE LUMINARIAS

El tipo de luminaria se puede importar de catálogos de empresas que cuenten con complementos para DIALux. En la barra superior del proyecto dando clic en la pestaña 'Fabricante' se puede acceder a los catálogos de distintos fabricantes.



**Figura 2.4** Ejemplo de fabricantes con complementos en DIALux  
[Elaboración propia, obtenido de DIALux]

### 2.1.3 DISPOSICIÓN DE LAS LUMINARIAS

La disposición de las luminarias depende de la topología de la red como distancia entre postes, altura del punto de luz, saliente, ángulo de inclinación, luminarias por mástil, y se deberá establecer de acuerdo a las características de la vía que se escoja.

Distancia entre mástiles	15.000 m	<input checked="" type="checkbox"/> Opti...
Mínimo	10.000 m	
Máximo	50.000 m	
Amplitud de paso	1.000 m	
Altura del punto de luz	8.000 m	<input type="checkbox"/>
Inclinación del brazo	0.0 °	<input type="checkbox"/>
Saliente del punto de luz	0.000 m	<input type="checkbox"/>
Rotación de mástil	0.0 °	
Luminarias por mástil	1	
Distancia mástil-calzada	0.000 m	<input type="radio"/>
Longitud del brazo	0.000 m	<input checked="" type="radio"/>
Desplazamiento longitudinal	0.000 m	

**Figura 2.5** Características de la disposición de las luminarias [Elaboración propia, obtenido de DIALux]

Algunas variables se pueden optimizar de acuerdo a las especificaciones técnicas mínimas y máximas del diseño de iluminación. Por ejemplo, la distancia entre postes puede optimizarse entre 35 m y 40 m usando luminarias LED, el software automáticamente simula y calcula la distancia entre postes más óptima con la cual se logran cumplir los requerimientos de la regulación, otras variables que se pueden optimizar son el ángulo de inclinación del brazo, la altura del punto de luz, saliente y distancia mástil-calzada o longitud del brazo.

#### 2.1.4 DOCUMENTACIÓN

La documentación se genera por cada recuadro de evaluación y los resultados se comparan de acuerdo a los requerimientos de la norma EN-13201, pero pueden ser modificados de acuerdo a los requerimientos de la regulación ARCONEL 006/18.

Recuadro de evaluación (M4)	Calzada 1 (M4)
Lm [cd/m <sup>2</sup> ]	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.75 4.09 ✓
Uo	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.40 0.73 ✓
Ul	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.60 0.86 ✓
TI	<input checked="" type="checkbox"/> ≤ 15 - ✓
EIR	≥ 0.30 0.52
Recuadro de evaluación (P4)	Camino peatonal 1 (P4)

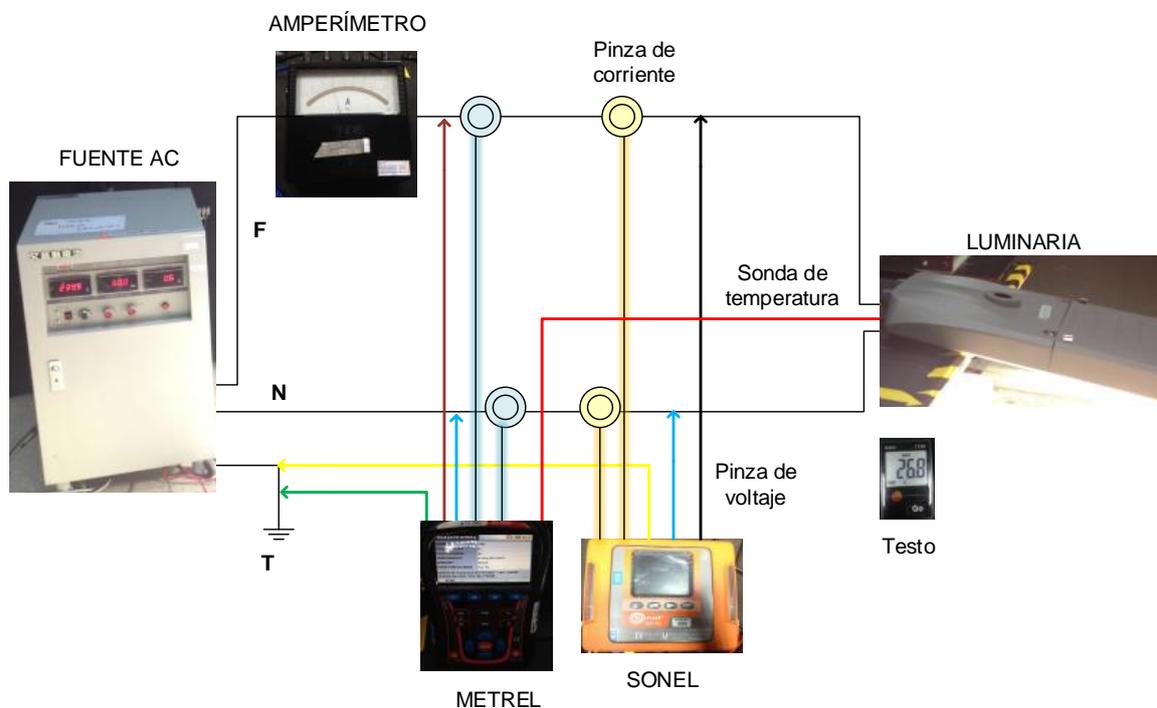
**Figura 2.6** Recuadro de evaluación en DIALux [Elaboración propia, obtenido de DIALux]

## 2.2. ENSAYOS EN EL LABORATORIO

Los ensayos están enfocados a la medición del contenido armónico de corriente producido por cada luminaria. La norma que se emplea como referencia para este tipo de ensayos es la IEC 61300-3-2.

### 2.2.1 CIRCUITO DE ENSAYO

La Figura 2.7 muestra el circuito de ensayo empleado para la medición de las dos luminarias en cumplimiento con la norma IEC 61000-3-2 (Circuito de medida para los equipos monofásicos).



**Figura 2.7** Diagrama esquemático del circuito de ensayo empleado para medición de las luminarias [Elaboración propia]

Cada luminaria es conectada individualmente a un voltaje monofásico de 240 V usando una fuente controlada de voltaje ( $\pm 2\%$ ). El período de medición es mayor a un día, sin embargo, no se miden por un lapso de 7 días debido que, al tratarse de una carga de iluminación constante, no es necesario diferenciar entre días laborales y fines de semana. El período de agregación es un intervalo de 10 minutos para las medidas eléctricas y 1 minuto para la medición de temperatura.

Las mediciones eléctricas de calidad de energía fueron realizadas usando dos analizadores de redes eléctricas (METREL MI 2892, SONEL PQM-711), mientras que la medición de

temperatura se realizó con la sonda de temperatura del METREL calibrada bajo el estándar ISO 17025 y el mini registrador de datos de temperatura y humedad Testo 174H.

## 2.2.2 CONDICIONES DE ENSAYO

De acuerdo a la norma IEC 61000-3-2, las luminarias pertenecen a la Clase C (Equipo de iluminación) y los límites aplicables para la norma se evalúan hasta el armónico 40, bajo las siguientes condiciones de ensayo:

1. Se establece que las medidas deben realizarse en una atmosfera libre de corrientes de aire y con una temperatura ambiente en el rango de 20 °C a 27 °C.
2. Durante las medidas la temperatura no debe variar más de 1 °C.

Para el cumplimiento de este requisito se instaló el circuito de ensayo mostrado en la Figura 2.7 dentro del cuarto climatizado del Laboratorio de Luminotecnia del IIGE a una temperatura controlada de 25 °C  $\pm$  1 °C.



**Figura 2.8** Sistema de climatización del laboratorio

[Elaboración propia, obtenida de foto digital]

Adicionalmente se realizan mediciones sin climatización para determinar si la temperatura tiene un efecto significativo en las magnitudes armónicas de corriente medidas en cada luminaria.

### 2.2.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación empleada mientras se realizan las medidas debe cumplir los siguientes requisitos:

1. El voltaje de ensayo debe mantenerse dentro de  $\pm 2 \%$  y la frecuencia debe mantenerse en  $\pm 0,5 \%$  del valor seleccionado.
2. La distorsión armónica del voltaje de ensayo no debe sobrepasar los siguientes valores:
  - 0,9% para un armónico de orden 3
  - 0,4% para un armónico de orden 5
  - 0,3% para un armónico de orden 7
  - 0,2% para un armónico de orden 9
  - 0,2% para armónicos pares de orden comprendido entre el 2 y el 10
  - 0,1% para armónicos de orden comprendido entre el 11 y el 40
3. El valor de cresta del voltaje de ensayo debe estar comprendido entre 1,4 a 1,42 veces su valor eficaz y debe alcanzarse entre los  $87^\circ$  y  $93^\circ$  después del paso por cero.

### 2.2.4 EQUIPO DE MEDIDA

Los requisitos para el equipo de medida se definen en las normas IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7. Los analizadores cumplen con los requisitos de la Norma IEC 61000-4-7 e IEC 6100-4-30 especificados en sus manuales de usuarios.

IEC 61000-4-30 Sección y parámetro	Power Master Medición	Clase
4.4 Agregación de mediciones en intervalos de tiempo		A
4.6 Incertidumbre de reloj en tiempo real (RTC)		A
5.1 Frecuencia	Freq	A
5.2 Magnitud del suministro	V	A
5.3 Flicker	$P_{cp}$ , $P_{lt}$	A
5.4 Caídas y sobretensiones	$V_{Dip}$ , $V_{Swell}$ , duración	A
5.5 Interrupciones	Duración	A
5.7 Desequilibrio	$u^-$ , $u^0$	A
5.8 Armónicos de tensión	$V_{h0} \div 50$	A
5.9 Interarmónicos de tensión	$V_{ih0} \div 50$	A
5.10 Tensión de señalización de red	$V_{Sig}$	A

**Figura 2.9** Cumplimiento de la IEC 61000-4-30, METREL MI 2892 [40]

Estándares	
Métodos de medida	IEC 61000-4-30 Class A
Precisión de la medición	IEC 61000-4-30 Class A
Calidad de energía	EN 50160
Flicker	IEC 61000-4-15
Armónicos	IEC 61000-4-7
Seguridad	IEC 61010
EMC	IEC 61326
Estándar de calidad	Diseño, construcción y fabricación cumplen con la ISO 9001

**Figura 2.10** Estándares que cumple el analizador SONEL PQM-711 [41]

**Tabla 2.1** Especificaciones técnicas para medición de armónicos SONEL PQM-711 [41]

Armónicos	Rango y condiciones	Resolución	Incertidumbre
Armónico (n)	DC, 1...50, agrupamiento: subgrupos de armónicos de acuerdo a IEC 61000-4-7		
Amplitud $V_{RMS}$	0...200 % $V_{nom}$	0,01 % $V_{nom}$	$\pm 0,05$ % $V_{nom}$ si $V_h < 1$ % $V_{nom}$ $\pm 5$ % $V_h$ si $V_h \geq 1$ % $V_{nom}$ (IEC 61000-4-7 Clase I)
Amplitud $I_{RMS}$	Dependiendo de las pruebas usadas	0,01 % $I_{nom}$	$\pm 0,15$ % $I_{nom}$ si $I_h < 3$ % $I_{nom}$ $\pm 5$ % $I_h$ si $I_h \geq 3$ % $I_{nom}$ (IEC 61000-4-7 Clase I)
THD Voltaje (n=2...50)	0...100 % Para $V_{rms} \geq 1$ % $V_{nom}$	0,1 %	$\pm 5$ %
THD Corriente (n=2...50)	0...100 % Para $I_{rms} \geq 1$ % $I_{nom}$	0,1 %	$\pm 5$ %
Factor-K	1...50 Para $I_{rms} \geq 1$ % $I_{nom}$	0,1	$\pm 10$ %
Angulo de fase (voltaje)	-180°...+180°	0,1 °	$\pm (n \times 1$ °)
Angulo de fase (corriente)	-180°...+180°	0,1 °	$\pm (n \times 1$ °)

**Tabla 2.2** Especificaciones técnicas para medición de armónicos METREL MI 2892 [40]

Armónicos	Rango	Resolución	Incertidumbre
$V_{RMS}$	$V_h < 1$ % $V_{nom}$	10 mV	$\pm 0,15$ % $V_{nom}$
	$1$ % $V_{nom} < V_h < 20$ % $V_{nom}$	10 mV	$\pm 5$ % $V_h$
$I_{RMS}$	$I_h < 10$ % $I_{nom}$	10 mA	$\pm 0,15$ % $I_{nom}$
	$10$ % $I_{nom} < I_h < 100$ % $I_{nom}$	10 mA	$\pm 5$ % $I_h$
THD Voltaje	$0$ % $V_{nom} < THD_V < 20$ % $V_{nom}$	0,1 %	$\pm 0,3$
THD Corriente	$0$ % $I_{nom} < THD_I < 100$ % $I_{nom}$	0,1 %	$\pm 0,6$
	$100$ % $I_{nom} < THD_I < 200$ % $I_{nom}$	0,1 %	$\pm 0,3$

Por otro lado, de acuerdo al Teorema de Shannon para reproducir adecuadamente una señal de frecuencia  $f_{\max}$ , se requiere una frecuencia de muestreo mínima  $f_{\text{shannon}}$  igual a dos veces  $f_{\max}$  [42].

$$f_{\text{shannon}} = 2f_{\max} \quad (2.1)$$

Si se pretende analizar armónicos hasta el orden 40 es decir 2 400 Hz a una frecuencia fundamental de 60 Hz, la frecuencia mínima que satisface el teorema de Shannon es:

$$f_{\text{shannon}} > 2 \times 40 \times 60 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{shannon}} > 4\,800 \text{ Hz}$$

Los dos analizadores de red empleados cumplen con el teorema de Shannon, ya que la frecuencia de muestreo del analizador METREL MI 2892 es de 102,4 muestras por ciclo es decir 6 144 Hz y del analizador SONEL PQM-711 es de 170,67 muestras por ciclo es decir 10,24 kHz.



**Figura 2.11** Equipo de medición empleado [Elaboración propia, obtenida de foto digital]



**Figura 2.12** Pruebas en el laboratorio [Elaboración propia, obtenida de foto digital]

## **2.2.5 TRATAMIENTO DE DATOS**

Concluido el periodo de medición de cada luminaria se calcula el valor medio de las corrientes armónicas individuales durante el periodo de observación completo de ensayo.

Los resultados promedios se calculan sobre los datos de corriente armónica en porcentaje de la magnitud de la corriente fundamental.

## **2.3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CONTENIDO ARMÓNICO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN**

### **2.3.1 RED ELÉCTRICA**

Para facilitar el análisis de las redes de distribución se hace uso de programas computacionales como el software CYME. La complejidad de los sistemas de distribución hace necesario el uso de una herramienta que permita modelar todo el sistema de distribución y realizar simulaciones en cuanto a flujos de carga, calidad de energía, optimización, contingencias, etc.

El software CYME es una herramienta poderosa que abarca todo el análisis de sistemas de distribución y emplea algoritmos de simulación orientados a redes desbalanceadas como son los alimentadores primarios, al mismo tiempo que permite trabajar con datos georreferenciados.

En lo que respecta al análisis de contenido armónico el software permite realizar un análisis armónico, ejecutando dos procesos importantes [43]:

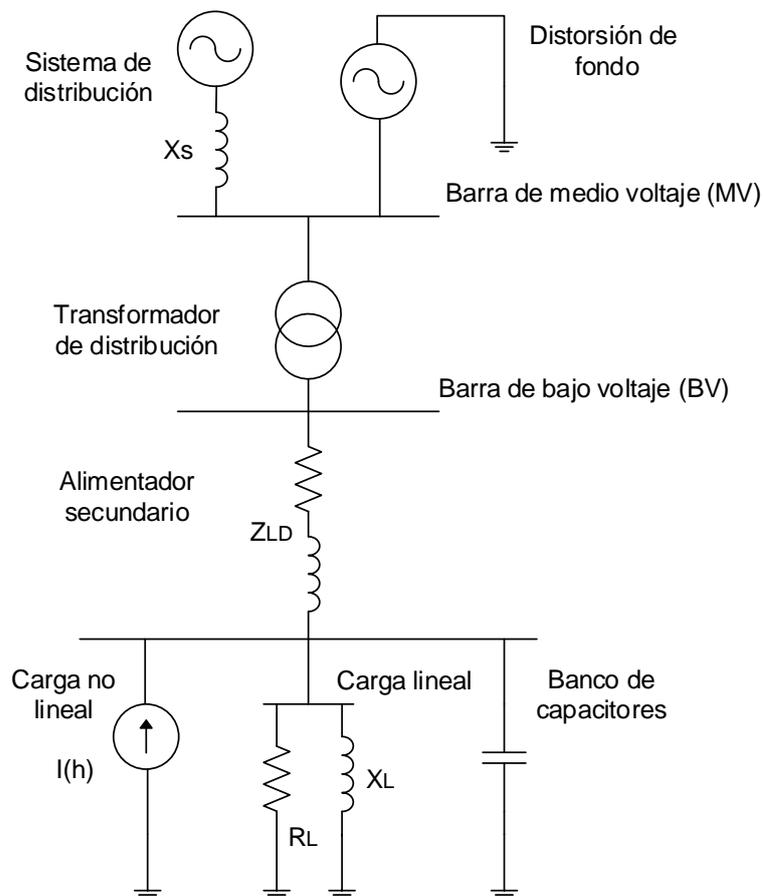
1. Métodos matriciales y vectoriales avanzados con una representación trifásica de la matriz de admitancia nodal del sistema.
2. Un robusto algoritmo de flujo de carga para obtener los perfiles de la corriente y el voltaje a la frecuencia fundamental para el cálculo de la distorsión armónica total y la presentación de la forma de la onda de corriente.

La red de distribución se estructura por medio de bases de datos y contiene dispositivos como fuentes, cables, líneas, transformadores, cargas no lineales y lineales, así como seccionadores, fusibles, reconectores, etc. Las características de cada equipo de la red se ingresan dentro de modelos propios del software para cada dispositivo.

Si bien el sistema de distribución está compuesto por varios alimentadores primarios (medio voltaje) y secundarios (bajo voltaje), para el estudio de armónicos de un alimentador primario específico, se emplea un equivalente Thevenin formado por una fuente de voltaje en serie con una impedancia ( $X_s$ ), la cual representa el suministro de energía a la frecuencia fundamental.

El primario del transformador de distribución se conecta a la red de medio voltaje y es necesario añadirle una fuente adicional de voltaje que representa la distorsión armónica de fondo generada por cargas no lineales antes del transformador de distribución (ver Figura 2.13), mientras que al secundario del transformador se conecta una red de bajo voltaje (alimentador secundario) con una impedancia ( $Z_{LD}$ ), a la cual se conectan las cargas no lineales y lineales.

Las cargas no lineales se representan por medio de una fuente armónica de corriente  $I(h)$  y las cargas lineales se representan como una impedancia ( $R+X_L$ ), adicionalmente si a la red se conectan otros dispositivos como un banco de capacitores, estos deben representarse como una impedancia ( $X_C$ ).



**Figura 2.13** Esquema de una red de distribución para estudios armónicos [38]

### **2.3.1.1 Fuentes Armónicas**

La modelación de las cargas no lineales se hace por el “Método de inyección de corriente” por medio de fuentes de corriente fijas, mientras que la distorsión de fondo de la red se representa por medio de una fuente armónica de voltaje fija.

Los datos de las fuentes armónicas fijas se ingresan en base a resultados de medición obtenidos en diferentes puntos de la red, o a nivel de laboratorio para cargas específicas. Los resultados de medición obtenidos en puntos de la red son más reales y reflejan la interacción entre cargas, los efectos de la impedancia de la red y los efectos de diversidad y atenuación.

Los errores cometidos en simulación dependerán de la cantidad de información disponible para el modelo de la red y de la cantidad de variables que el software considere. Por ejemplo, CYME permite considerar el efecto piel, y representar a líneas y cables por su modelo  $\pi$  lo cual resulta de gran importancia para el cálculo del lugar geométrico de impedancia en función de la frecuencia.

#### **2.3.1.1.1 Diversidad**

La diversidad del ángulo de los componentes armónicos de cada carga no lineal puede producir un efecto de cancelación armónica que se observa en redes de bajo voltaje que se encargan de servir a diferentes tipos de cargas no lineales. La suma vectorial de los componentes armónicos de cada carga no lineal es menor a la suma aritmética debido a la diversidad de los ángulos de cada componente armónico, que provoca que la magnitud armónica resultante disminuya.

#### **2.3.1.1.2 Atenuación**

Si se consideran cargas del mismo tipo conectadas a la red de distribución de bajo voltaje solo se analiza el efecto de atenuación, el cual ocurre debido a la impedancia propia del sistema y a su correspondiente distorsión de voltaje que tiende a reducir la corriente armónica total producida por las cargas no lineales.

## 2.4. ANÁLISIS FINANCIERO

La evaluación de proyectos puede hacerse de acuerdo a cuatro enfoques: financiero, económico social, técnico y político. Los proyectos eléctricos pueden ser evaluados desde todos estos enfoques.

El análisis financiero permite identificar la inversión necesaria para la ejecución de un proyecto, considera tanto ingresos y egresos atribuibles a su realización y en consecuencia la rentabilidad generada por el mismo [44].

La evaluación económica y social consiste en medir la bondad del proyecto desde el punto de vista de toda la colectividad. Es un enfoque macroeconómico por lo que se deben considerar las distorsiones de mercado producidas por los impuestos y los subsidios, y revisar los costos y beneficios del proyecto para incluir aquellos elementos que tienen impacto en la comunidad.

La viabilidad o evaluación técnica se refiere al grado en que una política concuerda con las capacidades institucionales existentes, haciendo posible la movilización de recursos humanos, materiales, administrativos y organizacionales que el proyecto requiere.

La viabilidad o evaluación política se refiere al grado en que una política sirve para la construcción de una coalición de apoyo, permitiendo el uso de ciertos elementos para crear legitimidad o credibilidad para las acciones emprendidas [44].

La evaluación financiera de este proyecto permitirá medir la rentabilidad de la inversión necesaria para realizar el reemplazo de las luminarias SAP por luminarias LED y además generará información necesaria para realizar una comparación del proyecto con otras alternativas.

De forma resumida la evaluación financiera requiere de dos pasos importantes:

1. Elaboración del “Flujo de Fondos”
2. Considerar el valor del dinero en el tiempo y calcular un indicador que refleje la rentabilidad del proyecto

## 2.4.1 FLUJO DE FONDOS NETO

El flujo de fondos registra tanto los ingresos y egresos de efectivo durante un periodo de tiempo que depende de la duración del proyecto [44]. Los elementos del flujo de fondos son:

1. Ingresos
2. Costos: Inversión y Operación
3. Costo de oportunidad
4. Depreciación y amortización

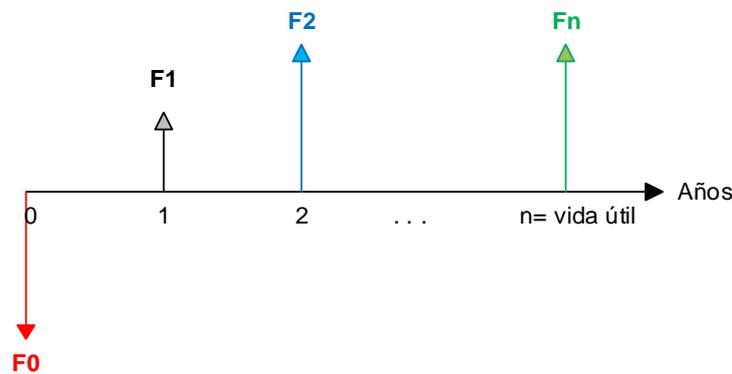


Figura 2.14 Flujo de fondos neto [45]

## 2.4.2 INDICADORES

Los indicadores de rentabilidad son: el valor presente neto (*VAN*), la tasa interna de retorno (*TIR*) y la relación beneficio costo (*B/C*).

### 2.4.2.1 Valor presente neto

El valor presente neto *VAN* representa el equivalente financiero en el presente del flujo de fondos neto. Este indicador depende de los flujos de fondos netos y de la tasa de descuento (*d*) determinada [45].

$$VAN = \sum_{k=0}^n \left( \frac{F_k}{(1+d)^k} \right) = F_0 + \frac{F_1}{(1+d)^1} + \frac{F_2}{(1+d)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+d)^n} \quad (2.2)$$

La viabilidad del proyecto de acuerdo al *VAN* se resume en:

- Si  $VAN = 0$ ; proyecto indiferente
- Si  $VAN > 0$ ; proyecto viable
- Si  $VAN < 0$ ; proyecto no viable

### 2.4.2.2 Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno  $TIR$  es un indicador que representa la máxima rentabilidad que el proyecto podría ofrecer. Se lo calcula igualando la Ecuación 2.2 a cero y resolviendo la ecuación para la incógnita  $d$ . Esta ecuación tendrá tantas soluciones como la vida útil del proyecto. Las soluciones negativas, así como las complejas no interesan. Gráficamente las soluciones reales están en el corte con el eje  $d$ , en la función  $VAN$ . Cuando existan varias  $TIR$ , se recomienda tomar una decisión en base a los indicadores  $VAN$  y  $TIR$  conjuntamente [45].

$$TIR = F_0 + \frac{F_1}{(1+d)^1} + \frac{F_2}{(1+d)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+d)^n} = 0 \quad (2.3)$$

La viabilidad del proyecto de acuerdo al TIR se resume en:

- Si  $TIR = d$ ; proyecto indiferente
- Si  $TIR > d$ ; proyecto viable
- Si  $TIR < d$ ; proyecto no viable

### 2.4.2.3 Relación beneficio costo

La relación beneficio costo  $B/C$  es un indicador financiero en términos a-dimensionales que se calcula llevando los flujos positivos ( $B$ ) y negativos ( $x$ ) al presente, para luego calcular el cociente del valor presente de los beneficios sobre los costos que serán el valor absoluto de los flujos negativos llevados al presente ( $|x|$ ) [45].

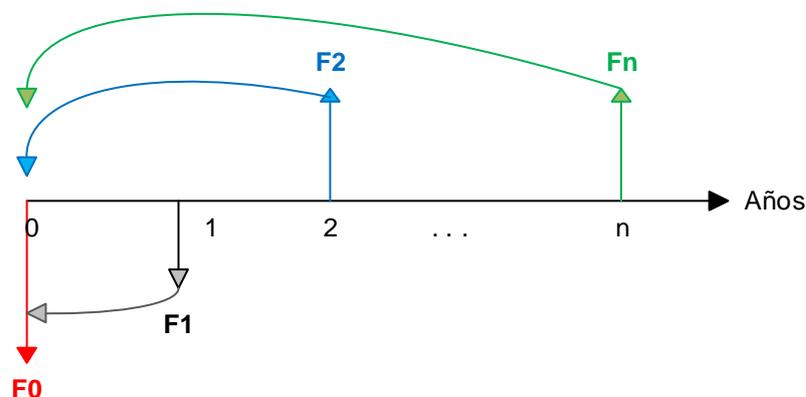


Figura 2.15 Flujo de fondos neto [45]



**Figura 2.16** Equivalente financiero de los flujos positivos y negativos en el presente [45]



**Figura 2.17** Valor presente de los beneficios y costos en valor absoluto [45]

La viabilidad del proyecto de acuerdo a  $B/C$  se resume en [44]:

- Si  $B/C = 1$ ; proyecto indiferente
- Si  $B/C > 1$ ; se acepta el proyecto
- Si  $B/C < 1$ ; se rechaza el proyecto

Finalmente, la viabilidad del proyecto de acuerdo a los indicadores planteados se resume en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Viabilidad del proyecto en base a los indicadores

	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>	<b>B/C</b>
<b>Indiferente</b>	$VAN = 0$	$TIR = d$	$B/C = 1$
<b>Viable</b>	$VAN > 0$	$TIR > d$	$B/C > 1$
<b>No viable</b>	$VAN < 0$	$TIR < d$	$B/C < 1$

Siempre y cuando el proyecto sea viable es posible determinar el tiempo de recuperación de la inversión que será el tiempo en el que el valor presente neto o  $VAN$  sea igual a 0, es decir cuando la inversión ( $F_0$ ) sea recuperada.

### 3. APLICACIÓN METODOLÓGICA

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el capítulo 2 a la red eléctrica de alumbrado público de la vía Bulevar de Santa Clara. La vía Bulevar se ubica en el Cantón Rumiñahui al Sur-Este de Quito y actualmente se encuentra iluminada por 89 luminarias SAP de 400 W alimentadas por dos transformadores monofásicos. Los transformadores monofásicos que se encuentran instalados en postes son el No. 41435 y el No. 41448. El transformador No. 41435 alimenta exclusivamente a 20 luminarias SAP, en tanto que el transformador No. 41448 alimenta a 69 luminarias SAP y un cliente residencial.

A continuación, se describe el procedimiento seguido en cada fase de la metodología y se emplean gráficas, diagramas de barras y tablas para el análisis de los resultados obtenidos en cada fase.

#### 3.1. DISEÑO DE ILUMINACIÓN VIAL

La vía Bulevar es una vía de cuatro carriles, dos carriles por sentido de circulación separados por un parterre central. La mayor parte de las luminarias se ubican en el parterre central en disposición axial sobre postes de hormigón de 11,5 m.



**Figura 3.1** Vía Bulevar de Santa Clara [46]

Para la simulación en DIALux se considera que el tipo de iluminación de la vía Bulevar es M2 de acuerdo a la Tabla 1.1 con las siguientes características:

**Tabla 3.1** Descripción del tipo de vía escogido para la simulación

Descripción de la vía	Tipo
Vías urbanas de tráfico importante, carreteras radiales. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía:	
<b>Pobre</b>	<b>M2</b>
<b>Bueno</b>	<b>M3</b>

Las características de la vía Bulevar para la simulación y sus parámetros fotométricos de acuerdo al tipo de vía se presentan en la Tabla 3.2.

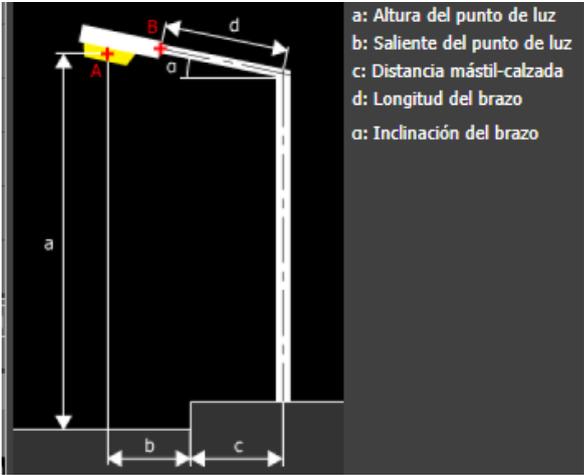
**Tabla 3.2** Características de la vía para la simulación

Tipo de vía	Condiciones de la vía	Parámetros fotométricos de evaluación
M2	Una calzada vehicular por lado, con ancho de 5,5 m (2 carriles en cada una), 2 aceras de 2 m cada una y un parterre central de 3 m. Pavimento clase R3, con un coeficiente de luminancia medio $Q_0$ de 0,07. Factor de mantenimiento: 0,89 contaminación baja	$L_m \geq 1,5 \text{ Cd/m}^2$ $U_o \geq 40 \%$ $U_I \geq 70 \%$ $TI \leq 10$ $SR \geq 0,5$

La clase para el pavimento y el coeficiente de luminancia medio (R3 y  $Q_0=0,07$ ) se definen de acuerdo a las especificaciones técnicas de las luminarias que se encuentran dentro del catálogo de unidades de propiedad del Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables (MERNNR) [47]. El coeficiente de luminancia ( $q$ ) se puede definir como la relación entre la luminancia y la iluminancia de un punto de la superficie del pavimento, este depende enteramente de la superficie: material de base, composición, textura, tiempo de uso, etc. El coeficiente de luminancia medio ( $Q_0$ ) cuantifica el grado de “claridad” de la superficie del camino [48].

De acuerdo a los datos de la vía en el sistema de información georeferenciado (GIS), la distancia promedio entre postes es de 37 m, por lo que se usa ese mismo valor para la simulación, mientras que el ángulo de inclinación de las luminarias se considera de  $15^\circ$ . La Tabla 3.3 resume los parámetros de la disposición de las luminarias ingresados en DIALux.

**Tabla 3.3** Parámetros de la disposición de las luminarias

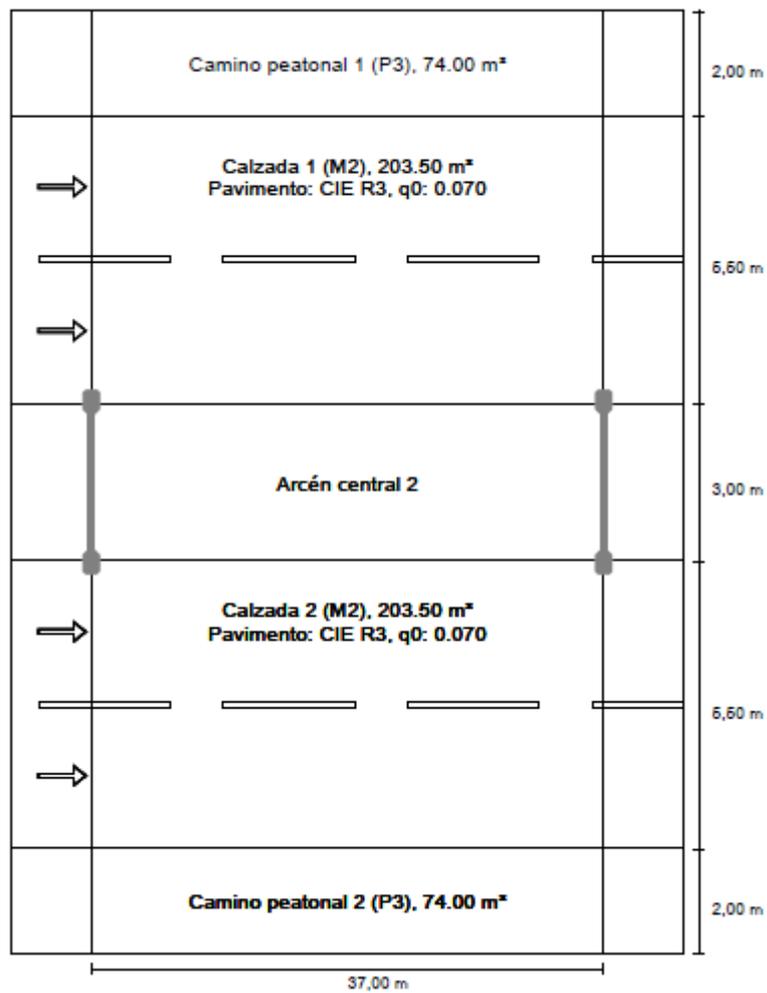
<b>Características</b>	
 <p>                     a: Altura del punto de luz                      b: Saliente del punto de luz                      c: Distancia mástil-calzada                      d: Longitud del brazo                      α: Inclinación del brazo                 </p>	
<b>Figura 3.2</b> Geometría del mástil [Elaboración propia, obtenido de DIALux]	
<b>Altura al punto de luz (a)</b>	11,5 m
<b>Saliente del punto de luz (b)</b>	0 m
<b>Longitud del brazo (d)</b>	1,5 m
<b>Inclinación (α)</b>	15 °
<b>Distancia entre mástiles</b>	37 m
<b>Tipo de disposición</b>	Sobre parterre central

En base a la información de la Tabla 1.5 la clase de iluminación para cada acera de tráfico peatonal se considera clase P3 para el desarrollo de este trabajo, con las siguientes características.

**Tabla 3.4** Características de la acera con tráfico peatonal

<b>Clase</b>	<b>Descripción del uso</b>	<b>Parámetros fotométricos de evaluación</b>
P3	Utilización nocturna moderada por peatones y ciclistas	$E \geq 1,5 \text{ lx}$

La Figura 3.3 muestra las dimensiones de la vía empleada para la simulación en DIALux.



**Figura 3.3** Esquema de diseño iluminación vial [Elaboración propia, obtenido de DIALux]

Concluido el diseño se calculan los valores de luminancia e iluminancia con una luminaria SAP de 400 W y luminarias LED. Las luminarias empleadas para la simulación son importadas de catálogos de fabricantes y sus características se muestran en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Características de las luminarias probadas en DIALux

Luminaria	Potencia Nominal [W]	Flujo luminoso [lm]
SODIO	400	42 433,82
LED	120	13 184,17
LED	150	17 121,21

Los resultados obtenidos con cada luminaria se muestran en la Tabla 3.6, en los tres casos se usa un factor de mantenimiento de 0,89.

**Tabla 3.6** Resultados de evaluación en DIALux

fm=0,89		REGULACIÓN 006/18	SAP 400 W	LED 120 W	LED 150 W
<b>Calzada (M2)</b>	<b>Lm [cd/m<sup>2</sup>]</b>	≥ 1,5	3,71 ✓	1,3 ✗	2,01 ✓
	<b>Uo</b>	≥ 0,4	0,79 ✓	0,68 ✓	0,68 ✓
	<b>UI</b>	≥ 0,7	0,81 ✓	0,85 ✓	0,83 ✓
	<b>TI [%]</b>	≤ 10	11 ✗	6 ✓	8 ✓
	<b>SR</b>	≥ 0,5	0,98 ✓	0,82 ✓	0,87 ✓
<b>Camino peatonal (P3)</b>	<b>Emin [lx]</b>	1,5	42,1 ✓	10,48 ✓	15,45 ✓

Como se puede observar en la Tabla 3.6 al emplear la luminaria LED de 120 W no se cumple con el valor mínimo de luminancia promedio requerido, de acuerdo a la regulación. Mientras que con la luminaria LED de 150 W se cumplen todas las especificaciones de la regulación ARCONEL No. 006/18. La documentación completa obtenida con la luminaria LED de 150 W se muestra en el ANEXO A.

Los resultados obtenidos demuestran que para el tipo de vía los valores de luminancia y deslumbramiento calculados con luminarias SAP de 400 W son bastante altos, e incluso el deslumbramiento TI se encuentra fuera de los límites.

### 3.2. ENSAYOS EN LABORATORIO

De acuerdo a los resultados obtenidos en la fase anterior, una luminaria LED de 150 W sería la adecuada a instalarse en la vía Bulevar cumpliendo con los requisitos de la regulación, en reemplazo de las luminarias SAP de 400 W que se encuentran actualmente instaladas.

Los ensayos en laboratorio fueron realizados en una luminaria LED de 150 W (Figura 3.5) con flujo luminoso de 17 128,2 lm (ver en ANEXO B) y en una luminaria de sodio de alta presión (Figura 3.4) de 400 W doble nivel de potencia (2P), correspondiente al mismo tipo de luminarias que se encuentran instaladas en la vía Bulevar.

Como se describió en la metodología los ensayos son llevados a cabo en dos escenarios, el primero sin climatización (SC) y el segundo con climatización (CC), con el objetivo de observar la influencia de la temperatura en las magnitudes armónicas.



**Figura 3.4** Luminaria de sodio 400 W-2P  
[Elaboración propia, obtenida de foto digital]

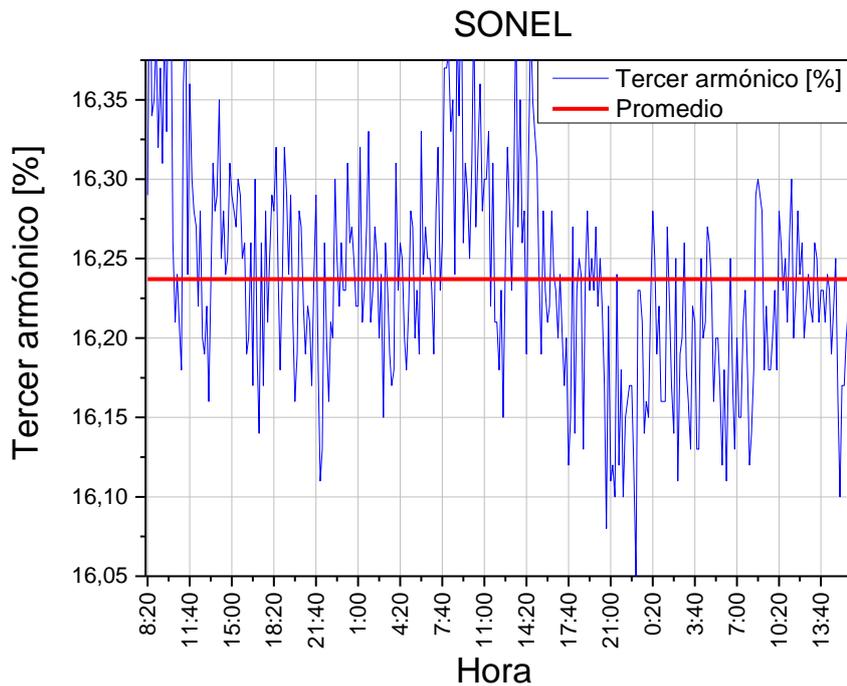


**Figura 3.5** Luminaria LED 150 W  
[Elaboración propia, obtenida de foto digital]

Los ensayos se realizan aplicando el circuito y requisitos de ensayo especificados en el capítulo anterior, durante los ensayos la fuente de voltaje cumplió con los requisitos de la norma IEC 61000-3-2 tal como se demuestra en el ANEXO C.

La temperatura registrada en los ensayos con climatización se muestra en el ANEXO D, en base al cuál se cumple con las condiciones de ensayo para equipos de iluminación de acuerdo a la norma IEC 61000-3-2.

Una vez concluido el periodo de medición de cada luminaria se calcula el valor medio de las corrientes armónicas individuales durante el periodo de observación completo de ensayo, y su desviación estándar. Por ejemplo, la Figura 3.6 muestra los resultados de medición del tercer armónico de corriente en porcentaje de la corriente fundamental y su valor promedio calculado (16,24).



**Figura 3.6** Tercer armónico de corriente en porcentaje de la corriente fundamental, medido con el analizador SONEL en la luminaria SAP de 400 W, escenario SC [Elaboración propia]

Este procedimiento se repite por cada orden armónico y se obtienen los resultados de la Tabla 3.7 y Tabla 3.8 donde se muestran los valores promedios por orden armónico, calculados con los datos medidos usando los dos equipos de medición y en los dos escenarios analizados.

La desviación estándar calculada por orden armónico durante todo el periodo de medición en las dos luminarias no sobrepasa el  $\pm 1\%$  con ninguno de los dos equipos como se muestra en el ANEXO E.

Los resultados se calcularon hasta el orden armónico 40 pero se resumen los datos hasta  $h=30$  por ser los datos más significativos.

**Tabla 3.7** Magnitudes armónicas (%) luminaria SAP 400 W

h	Sin Climatización		Con Climatización	
	METREL	SONEL	METREL	SONEL
1	100	100	100	100
2	0,30	0,23	0,24	0,19
3	16,19	16,24	16,21	16,22
4	0,11	0,11	0,09	0,09
5	6,05	6,07	6,04	6,05
6	0,09	0,09	0,06	0,06
7	3,46	3,47	3,40	3,40
8	0,15	0,15	0,07	0,07
9	1,21	1,21	1,14	1,14
10	0,08	0,08	0,05	0,05
11	0,34	0,35	0,32	0,32
12	0,06	0,06	0,04	0,03
13	0,46	0,46	0,42	0,42
14	0,04	0,04	0,03	0,02
15	0,27	0,27	0,26	0,26
16	0,03	0,03	0,02	0,01
17	0,15	0,15	0,13	0,13
18	0,04	0,03	0,03	0,02
19	0,16	0,16	0,14	0,14
20	0,03	0,03	0,03	0,02
21	0,18	0,18	0,17	0,18
22	0,03	0,03	0,03	0,03
23	0,07	0,06	0,05	0,05
24	0,03	0,02	0,03	0,02
25	0,08	0,08	0,08	0,08
26	0,03	0,02	0,03	0,03
27	0,15	0,15	0,15	0,15
28	0,03	0,02	0,03	0,02
29	0,06	0,05	0,05	0,05
30	0,03	0,02	0,03	0,02

**Tabla 3.8** Magnitudes armónicas (%) luminaria LED 150 W

h	Sin Climatización		Con Climatización	
	METREL	SONEL	METREL	SONEL
1	100	100	100	100
2	0,07	0,08	0,06	0,08
3	4,28	4,31	4,31	4,34
4	0,04	0,03	0,03	0,03
5	0,96	0,97	0,96	0,97
6	0,03	0,02	0,03	0,02
7	0,32	0,32	0,31	0,31
8	0,03	0,02	0,03	0,02
9	0,34	0,35	0,34	0,35
10	0,03	0,02	0,03	0,01
11	0,32	0,33	0,32	0,33
12	0,03	0,02	0,03	0,01
13	0,29	0,29	0,28	0,28
14	0,04	0,02	0,03	0,02
15	0,47	0,47	0,46	0,47
16	0,04	0,02	0,03	0,02
17	0,46	0,47	0,45	0,46
18	0,04	0,02	0,04	0,02
19	0,58	0,59	0,57	0,58
20	0,04	0,03	0,04	0,03
21	0,46	0,46	0,45	0,46
22	0,04	0,03	0,04	0,03
23	0,53	0,54	0,52	0,53
24	0,04	0,02	0,04	0,02
25	0,43	0,44	0,42	0,43
26	0,04	0,03	0,04	0,02
27	0,43	0,45	0,43	0,44
28	0,04	0,02	0,04	0,02
29	0,37	0,38	0,36	0,37
30	0,04	0,02	0,04	0,01

Los resultados obtenidos con los dos equipos son bastante similares, la variación máxima ( $0,3 - 0,23 = 0,07$ ) se presenta en el segundo armónico de corriente con la luminaria SAP de 400 W, como se muestra en la Tabla 3.9, sin embargo, de forma general las variaciones entre los resultados de medición con los dos equipos son pequeñas ( $\leq 0,07$ ).

Considerando que el equipo METREL se encuentra calibrado y presenta una mejor precisión se decide tener en cuenta los resultados de este equipo para la modelación en CYME.

**Tabla 3.9** Variación de valores medios calculados entre equipos por orden armónico

h	SODIO 400 W		LED 150 W	
	SC	CC	SC	CC
2	0,07	0,05	0,01	0,02
3	0,05	0,01	0,03	0,03
4	0	0,01	0	0
5	0,02	0	0,01	0,01
6	0	0	0,01	0,01
7	0,02	0	0	0
8	0	0	0,01	0,01
9	0	0	0	0
10	0	0	0,02	0,02
11	0	0	0	0
12	0	0,01	0,02	0,02
13	0	0	0	0
14	0,01	0,01	0,02	0,01
15	0	0	0,01	0,01
16	0,01	0,01	0,02	0,02
17	0	0	0,01	0,01
18	0,01	0,01	0,02	0,01
19	0	0	0,01	0,01
20	0,01	0,01	0,02	0,01
21	0	0	0,01	0,01
22	0,01	0,01	0,02	0,01
23	0	0	0,01	0,01
24	0,01	0,01	0,02	0,02
25	0	0	0,01	0,01
26	0,01	0,01	0,02	0,02
27	0	0	0,01	0,01
28	0,01	0,01	0,02	0,02
29	0	0	0,01	0,01
30	0,01	0,01	0,03	0,02

Comparando los resultados obtenidos con climatización y sin climatización, en la mayoría de los datos se observa que las magnitudes promedio calculadas sin climatización son mayores a las calculadas con climatización, sin embargo, las variaciones entre los dos escenarios son pequeñas ( $\leq 0,07$ ) como se muestra en la Tabla 3.10. La Tabla 3.10 resume la diferencia entre los valores medios calculados sin climatización y con climatización de la Tabla 3.7 y Tabla 3.8.

A pesar de la variación pequeña entre escenarios, para la modelación en CYME al considerar el escenario real en el que se encuentran las luminarias, se decide tomar en cuenta los valores calculados en el escenario sin climatización.

**Tabla 3.10** Diferencia entre valores medios calculados sin climatización y con climatización por orden armónico

h	SAP 400 W		LED 150 W	
	METREL	SONEL	METREL	SONEL
2	0,06	0,04	0,01	0
3	-0,02	0,02	-0,03	-0,03
4	0,02	0,02	0	0
5	0,01	0,03	0	0
6	0,03	0,03	0	0
7	0,06	0,07	0,01	0,01
8	0,07	0,07	0	0
9	0,06	0,07	0	0
10	0,03	0,03	0	0
11	0,02	0,02	0	0
12	0,02	0,02	0,01	0
13	0,05	0,05	0,01	0,01
14	0,02	0,02	0	0
15	0	0	0,01	0,01
16	0,01	0,02	0,01	0
17	0,01	0,01	0,01	0,01
18	0,01	0,01	0	0
19	0,02	0,02	0,01	0,01
20	0,01	0,01	0	0
21	0	0,01	0,01	0,01
22	0	0	0	0
23	0,01	0,01	0,01	0,01
24	0	0	0	0
25	0	0,01	0,01	0,01
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0,01
30	0	0	0	0

### 3.2.1 ARMÓNICOS DE CORRIENTE

En esta sección se analizan los resultados de los armónicos de corriente medidos en cada luminaria con respecto a la norma IEC 61000-3-2, la cual establece los límites para las emisiones de corriente armónica para equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase. Los límites de la norma se presentan por orden armónico y para el análisis de los resultados obtenidos se resumen los resultados en diagramas de barras.

Para la evaluación de los resultados se toma en cuenta la incertidumbre de la medición debida a la precisión de medición de los equipos ( $p$ ), así como la desviación estándar ( $\sigma$ ) calculada por orden armónico.

La Tabla 3.11 resume los datos de precisión de cada analizador empleado.

**Tabla 3.11** Precisión de cada equipo para la medición de armónicos de corriente

EQUIPO	PRECISIÓN	Rango de Medición
Metrel	0,15 % $I_{nom}^{10}$	$I_h^{11} < 10 \% I_{nom}$
	5 % $I_h$	$I_h > 10 \% I_{nom}$
Sonel	0,15 % $I_{nom}$	$I_h < 3 \% I_{nom}$
	5 % $I_h$	$I_h \geq 3 \% I_{nom}$

El cálculo del error total ( $E_{total}$ ) en la medición se realiza usando la siguiente fórmula [49]:

$$E_{total} = \sqrt{p^2 + \sigma^2} \quad (3.1)$$

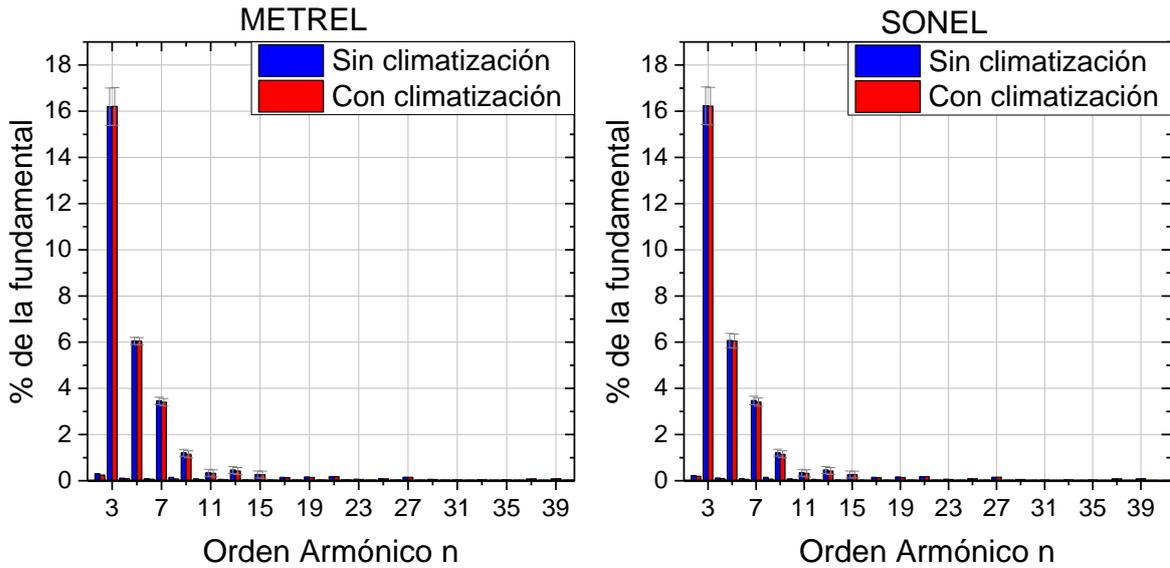
Donde los valores de la desviación estándar para cada orden armónico se toman de acuerdo a los datos del ANEXO E.

La Figura 3.7 y Figura 3.8 muestran los resultados obtenidos por orden armónico junto con su barra de error, en color azul se representan los resultados sin climatización y en color rojo los resultados a una temperatura controlada.

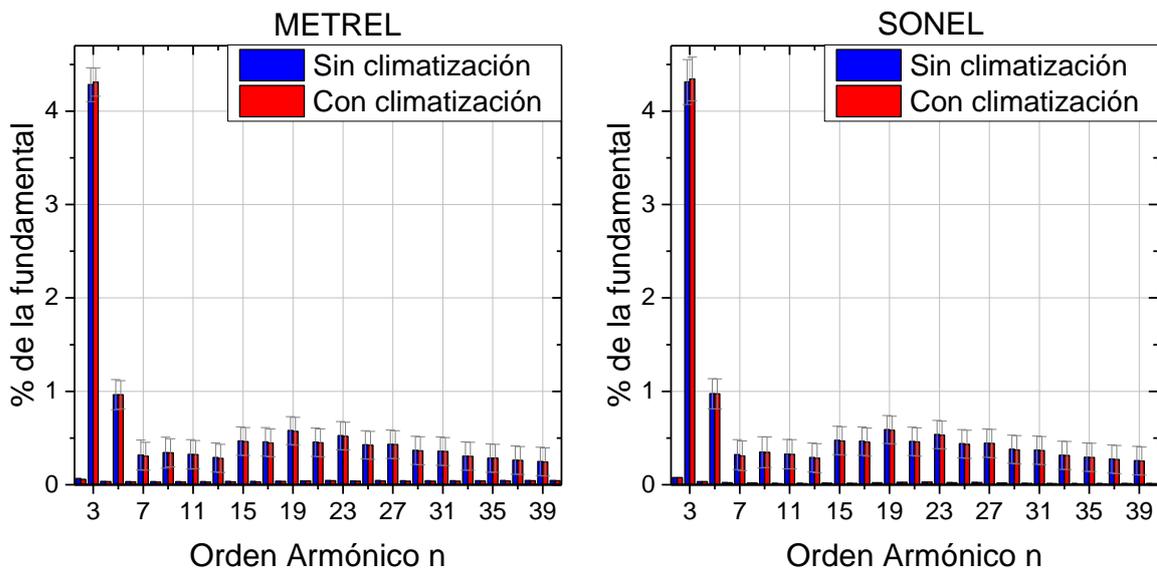
Las barras de error de los armónicos pares no se representan debido a que su magnitud es bastante pequeña y expresados en porcentaje la mayoría es menor a la precisión del equipo, por lo que pueden ser considerados despreciables.

<sup>10</sup> Corriente nominal (RMS)

<sup>11</sup> Corriente armónica medida (RMS)



**Figura 3.7** Espectro de frecuencias luminaria SAP 400 W [Elaboración propia]



**Figura 3.8** Espectro de frecuencias luminaria LED 150 W [Elaboración propia]

En la Figura 3.7 se observa que para la luminaria SAP el orden armónico de mayor magnitud es el tercero con un 16,2 % seguido de los armónicos 5, 7 y 9. Conforme aumenta el orden armónico su magnitud disminuye hasta ser prácticamente cero. De acuerdo a la norma al no sobrepasar el 0,6 % de la corriente de entrada medida, los armónicos de orden par e impar a partir del armónico 11 podrían ser despreciados.

En la luminaria LED 150 W como se muestra en la Figura 3.8 el orden armónico de mayor magnitud también es el tercero con el 4,3 % seguido de los armónicos 5, 19, 23, existe un incremento en magnitud de los armónicos de mayor orden como son el 19 y 23, sin embargo, el orden armónico de mayor magnitud ( $n=3$ ) sigue siendo bajo. En este caso los

armónicos de mayor orden impares decrecen, pero no al mismo ritmo que en la luminaria SAP, comparados con esta los resultados obtenidos son más altos.

La Tabla 3.12 y Tabla 3.13 muestran los datos de la Figura 3.7 y Figura 3.8 comparados con los límites de la norma, en base a los cuáles se concluye que el contenido armónico de corriente de las luminarias LED de 150 W y SAP de 400 W se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma IEC 61000-3-2 (Tabla 1.7).

**Tabla 3.12** Magnitudes armónicas (%) luminaria SAP 400 W y límites de la norma

h	Sin Climatización		Con Climatización		Norma
	METREL	SONEL	METREL	SONEL	
2	0,3 ± 0,15 ✓	0,23 ± 0,15 ✓	0,24 ± 0,15 ✓	0,19 ± 0,15 ✓	2
3	16,19 ± 0,81 ✓	16,24 ± 0,81 ✓	16,21 ± 0,81 ✓	16,22 ± 0,81 ✓	29,4
5	6,05 ± 0,16 ✓	6,07 ± 0,31 ✓	6,04 ± 0,16 ✓	6,05 ± 0,31 ✓	10
7	3,46 ± 0,16 ✓	3,47 ± 0,18 ✓	3,40 ± 0,16 ✓	3,40 ± 0,18 ✓	7
9	1,21 ± 0,15 ✓	1,21 ± 0,15 ✓	1,14 ± 0,15 ✓	1,14 ± 0,15 ✓	5
11	0,34 ± 0,15 ✓	0,35 ± 0,15 ✓	0,32 ± 0,15 ✓	0,32 ± 0,15 ✓	3
13	0,46 ± 0,15 ✓	0,46 ± 0,15 ✓	0,42 ± 0,15 ✓	0,42 ± 0,15 ✓	3
15	0,27 ± 0,15 ✓	0,27 ± 0,15 ✓	0,26 ± 0,15 ✓	0,26 ± 0,15 ✓	3
17-39	≤ 0,18 ✓	≤ 0,18 ✓	≤ 0,18 ✓	≤ 0,18 ✓	3

**Tabla 3.13** Magnitudes armónicas (%) luminaria LED 150 W y límites de la norma

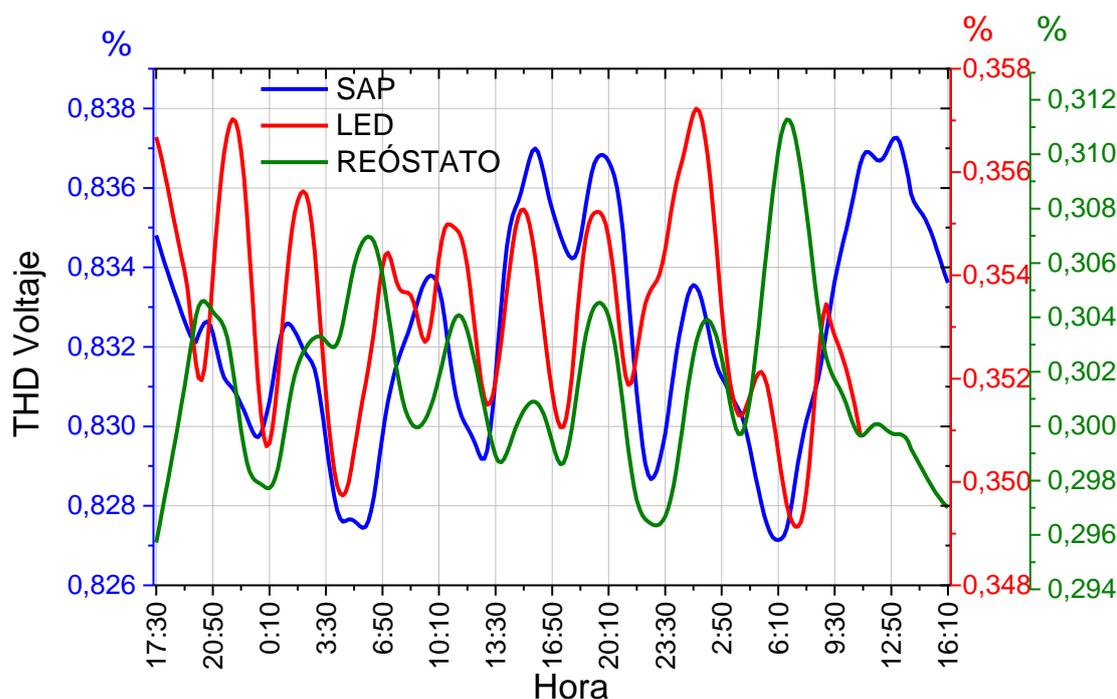
h	Sin Climatización		Con Climatización		Norma
	METREL	SONEL	METREL	SONEL	
2	0,07 ± 0,15 ✓	0,08 ± 0,15 ✓	0,06 ± 0,15 ✓	0,08 ± 0,15 ✓	2
3	4,28 ± 0,18 ✓	4,31 ± 0,24 ✓	4,31 ± 0,15 ✓	4,34 ± 0,24 ✓	29,7
5	0,96 ± 0,16 ✓	0,97 ± 0,16 ✓	0,96 ± 0,15 ✓	0,97 ± 0,16 ✓	10
7	0,32 ± 0,16 ✓	0,32 ± 0,16 ✓	0,31 ± 0,15 ✓	0,31 ± 0,16 ✓	7
9	0,34 ± 0,16 ✓	0,35 ± 0,16 ✓	0,34 ± 0,15 ✓	0,35 ± 0,16 ✓	5
11	0,32 ± 0,16 ✓	0,33 ± 0,16 ✓	0,32 ± 0,15 ✓	0,33 ± 0,16 ✓	3
13	0,29 ± 0,16 ✓	0,29 ± 0,16 ✓	0,28 ± 0,15 ✓	0,28 ± 0,16 ✓	3
15	0,47 ± 0,15 ✓	0,47 ± 0,15 ✓	0,46 ± 0,15 ✓	0,47 ± 0,15 ✓	3
17-39	≤ 0,6 ± 0,15 ✓	≤ 0,6 ± 0,15 ✓	≤ 0,6 ± 0,15 ✓	≤ 0,6 ± 0,15 ✓	3

### 3.2.2 DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE Y CORRIENTE

Con el objetivo de comparar el contenido armónico generado por cada luminaria y la distorsión armónica de voltaje que aporta la fuente empleada, se mide el contenido armónico de la fuente al conectar un reóstato de  $230 \Omega / 1,5 \text{ A}$ , a un voltaje de  $240 \text{ V } 1\phi$ .

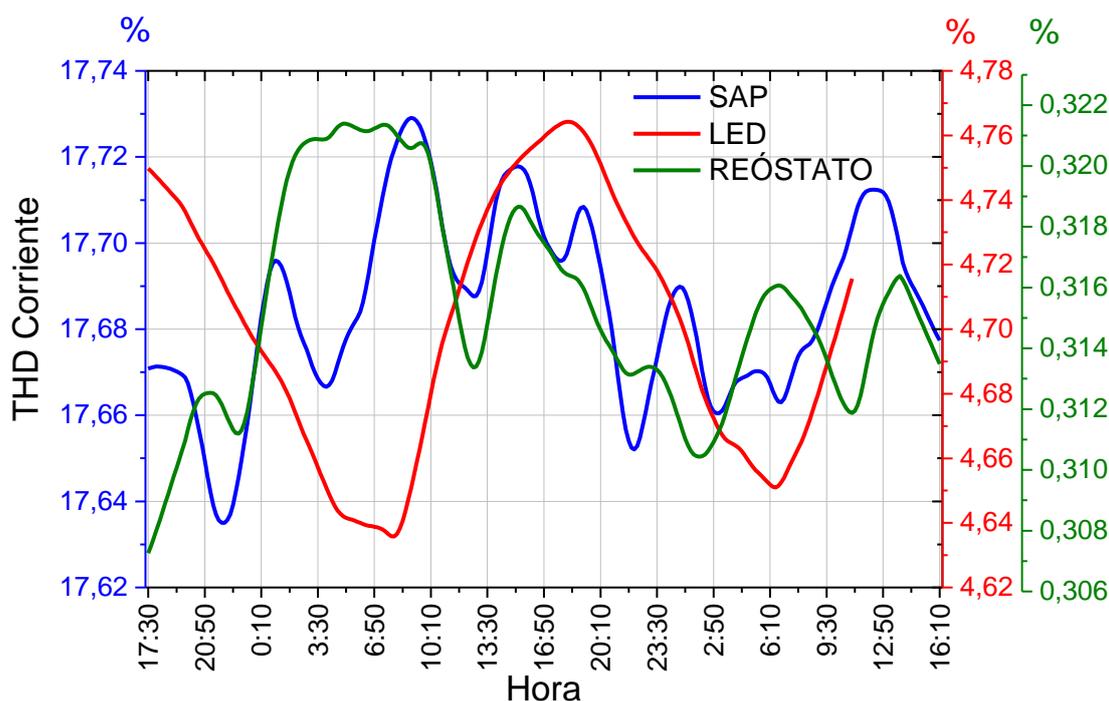
Para observar una posible influencia de la temperatura en el comportamiento de las magnitudes armónicas los resultados que se analizan son los obtenidos en el escenario sin climatización, recordando que como se vio antes, no existe una variación significativa entre los resultados promedios sin climatización y con climatización.

Los resultados durante todo el periodo de medición fueron ajustados usando el software de análisis de datos y gráficos Origin, con el propósito de observar la tendencia principal de los resultados de medición. Los resultados con cada tipo de carga se superponen en una misma gráfica, sin embargo, es importante recalcar que las escalas son diferentes.



**Figura 3.9** Distorsión armónica total de voltaje [%] por tipo de carga  
[Elaboración propia]

La Figura 3.9 muestra que la magnitud del THDV obtenido con la luminaria LED de 150 W es similar al obtenido con la carga puramente resistiva, mientras que la luminaria de sodio produce el mayor THD de voltaje y su magnitud es 2 veces mayor al de la luminaria LED de 150 W, como se muestra en la Tabla 3.14.



**Figura 3.10** Distorsión armónica total de corriente [%] por tipo de carga  
[Elaboración propia]

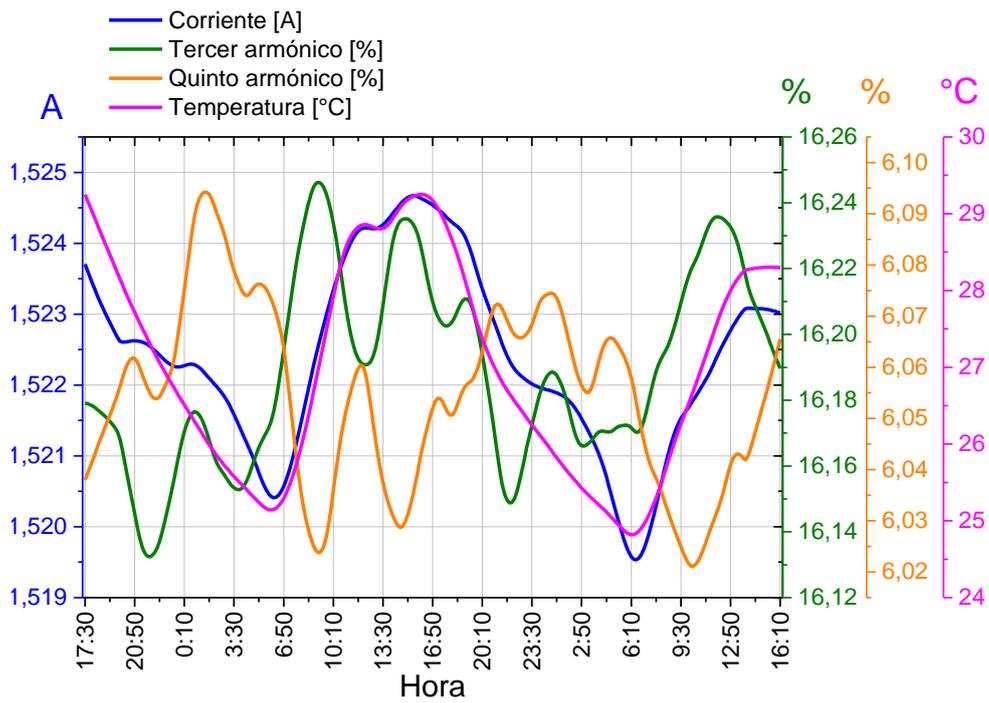
La Figura 3.10 muestra que el THDI obtenido con la luminaria LED 150 W ya no es similar al obtenido con la carga resistiva como en el caso del THDV. El valor promedio de distorsión armónica de corriente de la luminaria LED 150 W es de 4,7 %, sin embargo, la mayor distorsión de corriente se produce con la luminaria SAP de 400 W con un THDI del 17,7 %.

La Tabla 3.14 resume los valores medios calculados en cada período de medición por tipo de carga.

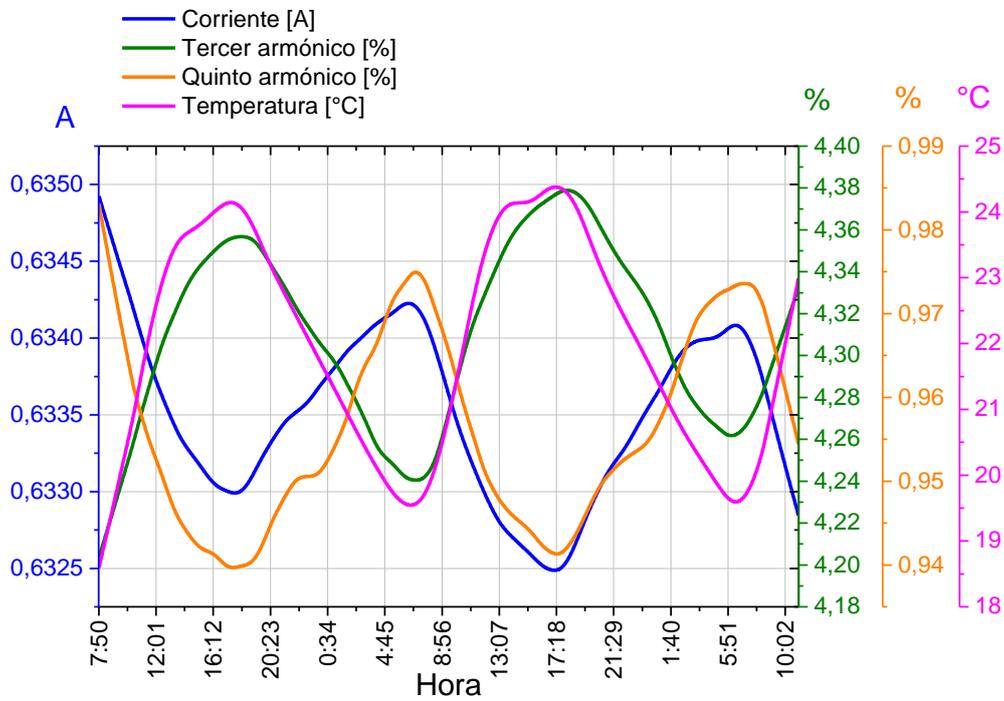
**Tabla 3.14** Valor medio de THD de corriente y voltaje por tipo de carga

	Reóstato	Luminaria LED	Luminaria SAP
THD Voltaje [%]	0,3	0,4	0,8
THD Corriente [%]	0,3	4,7	17,7

La variación en magnitud del THD de corriente en el dominio del tiempo en las luminarias SAP y LED se debe en parte a la influencia de la temperatura, las siguientes figuras muestran la correlación que existe entre la temperatura del entorno y los armónicos más significativos de corriente.



**Figura 3.11** Corriente, armónicos y temperatura en la luminaria SAP 400 W  
[Elaboración propia]



**Figura 3.12** Corriente, armónicos y temperatura en la luminaria LED 150 W  
[Elaboración propia]

En la luminaria SAP de 400 W (Figura 3.11) la corriente y el tercer armónico de corriente están directamente correlacionados con la temperatura, existe una mayor correlación de la temperatura con la corriente que con el tercer armónico, mientras que el quinto armónico esta inversamente relacionado con la temperatura y en igual grado que el tercero.

En la luminaria LED de 150 W (Figura 3.12) la corriente y el quinto armónico tienen una correlación inversa y fuerte con la temperatura, mientras que el tercer armónico tiene una relación fuerte pero directa con la temperatura.

De los resultados observados en las figuras se puede concluir que el tercer armónico de corriente, en ambas tecnologías, está siempre en correlación directa con la temperatura y en la luminaria LED en mayor grado que en la luminaria SAP. El tercer y quinto armónico siempre varían en sentidos opuestos. Por último, la corriente en la luminaria SAP aumenta conforme aumenta la temperatura ambiente, mientras que la corriente en la luminaria LED disminuye conforme la temperatura aumenta.

A pesar de estos resultados, una variación en temperatura de alrededor de 5,6 °C y 4,7 °C para las luminarias LED y SAP respectivamente, no genera variaciones significativas en la magnitud de corriente en ninguna de las dos luminarias, e incluso en el caso del tercer armónico apenas se observa una variación del 0,11 % en la luminaria LED y del 0,31 % en la luminaria SAP, esto de acuerdo a los resultados obtenidos previo al proceso de ajuste.

### 3.3. ANÁLISIS ELÉCTRICO

Para el análisis se escogió el transformador monofásico No. 41435, el cual alimenta exclusivamente a 20 cargas de iluminación que son luminarias de sodio de alta presión cerradas de 400 W y doble nivel de potencia (2P). La Tabla 3.15 muestra las características del transformador.

**Tabla 3.15** Características del transformador No. 41435

<b>Capacidad nominal</b>	25 kVA
<b>Voltaje en el primario</b>	13,16 kV
<b>Voltaje en el secundario</b>	0,24 kV
<b>Pérdidas en vacío</b>	0,09 kW
<b>Impedancia</b>	4,5 %
<b>Relación X/R</b>	4
<b>Fase de conexión</b>	C

En primer lugar, se modela la red actual y se verifican los resultados obtenidos de las simulaciones con la información del contenido armónico medido en la red. Posteriormente se reemplazan las luminarias SAP por las luminarias de tecnología LED en base a los datos obtenidos en las mediciones en el laboratorio.

### 3.3.1 RED ELÉCTRICA

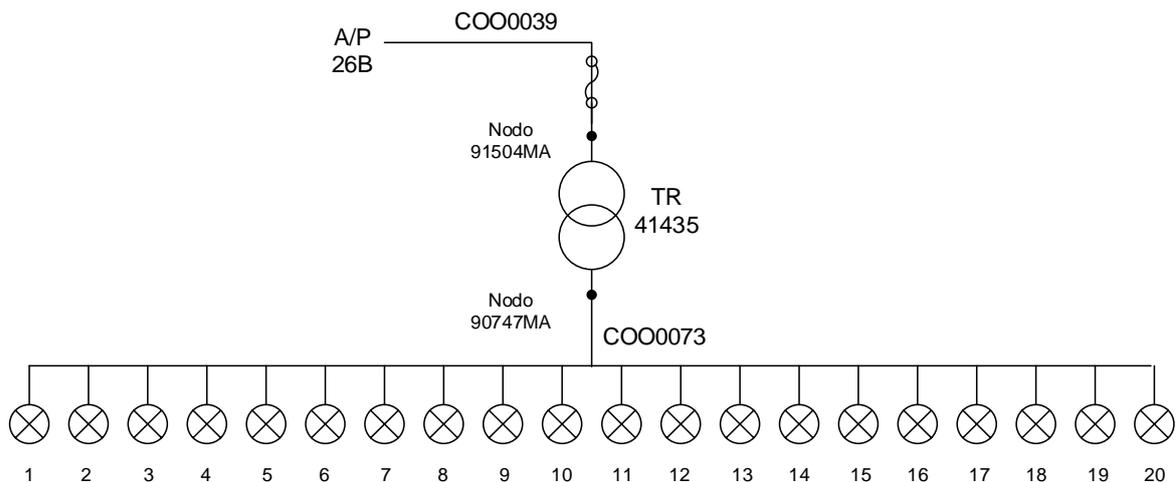
La red eléctrica de distribución se modela en el software de análisis de redes eléctricas CYME. El transformador monofásico bajo análisis en este estudio (No. 41435) está ubicado en la vía Bulevar y se conecta al alimentador B de la subestación Alangasí (26B).



**Figura 3.13** Alimentador 26B [Fuente EEQ, obtenida de CYME]

El voltaje del alimentador es de  $22,8 \text{ kV}_{L-L}$  y el suministro de energía se realiza por medio de un equivalente Thevenin con una fuente de voltaje trifásica de secuencia positiva y los valores de impedancias de secuencias obtenidas a partir de un cálculo de corto circuitos en el punto de conexión.

La Figura 3.14 muestra un circuito esquemático de la conexión del transformador No. 41435 al alimentador primario 26B y sus cargas.



**Figura 3.14** Circuito esquemático de conexión del transformador bajo análisis  
[Elaboración propia]

El transformador No. 41435 al ser monofásico se conecta solo a una fase del alimentador que es la fase C, el secundario de este transformador se conecta a un conductor de fase COO0073 que corresponde a un conductor THHN<sup>12</sup> de cobre #4 AWG 21,15 mm<sup>2</sup>, mientras que el primario del transformador se conecta a un conductor de fase COO0039 que corresponde a un conductor ASC<sup>13</sup> #2 AWG de 33,62 mm<sup>2</sup> [50].

Las cargas conectadas a los 237 transformadores que presenta el alimentador 26B se modelan como cargas concentradas que representan la potencia total de consumo de todas las cargas conectadas a cada transformador. La carga total concentrada del transformador No. 41435 se determina en base a mediciones realizadas por la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) en el secundario del transformador.

En base a las mediciones realizadas en campo y las mediciones realizadas en el laboratorio se modela el contenido armónico de la red secundaria del transformador.

### 3.3.2 MODELO DE LAS FUENTES ARMÓNICAS

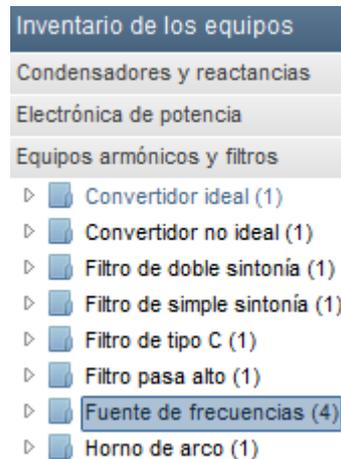
Para modelar el contenido armónico se utiliza el Método de Inyección de Corrientes por medio de fuentes de corriente fijas, al usar fuentes de corriente fijas se toma por supuesto el hecho de que la señal de voltaje no presenta distorsión.

CYME cuenta en su librería “inventario de equipos”, con equipos armónicos y filtros, dentro de los cuales está la fuente de frecuencias. El programa cuenta con una fuente de

<sup>12</sup> Aislación vinilo/termoplástico

<sup>13</sup> Conductor de aluminio

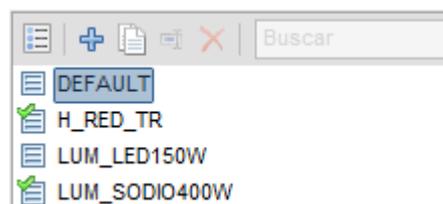
frecuencias DEFAULT pero también permite crear nuevas fuentes de frecuencias ya sean de corriente o de voltaje.



**Figura 3.15** Fuente de frecuencias en CYME

[Elaboración propia, obtenida de CYME]

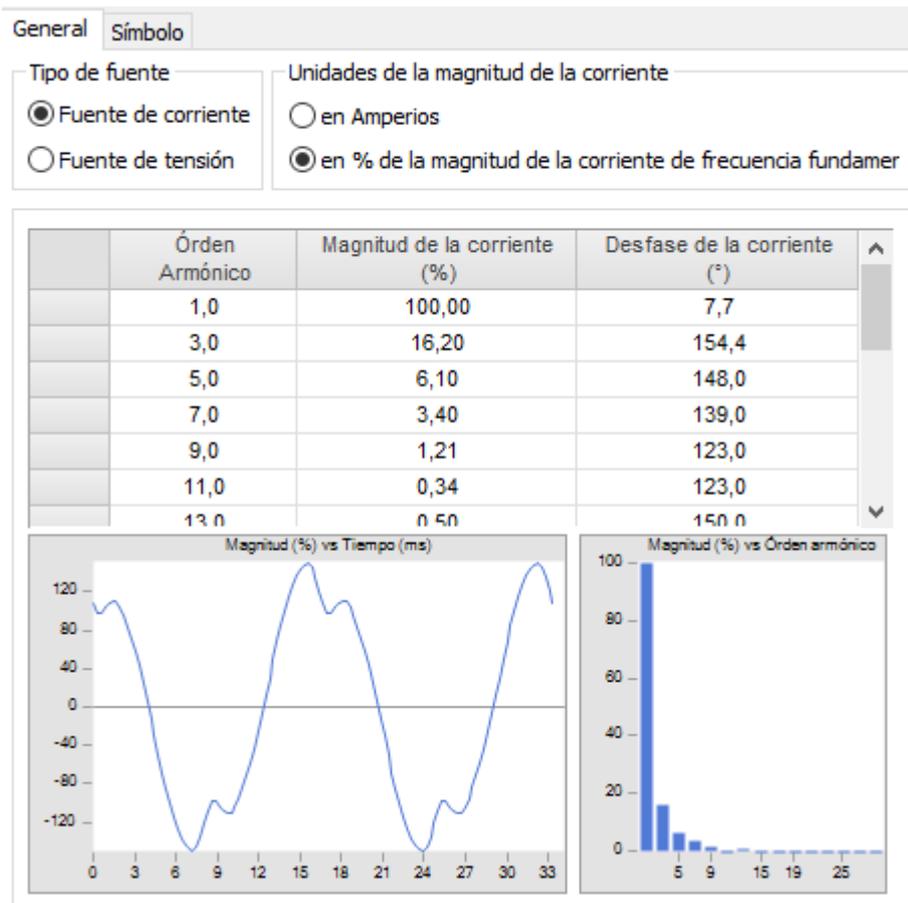
Para crear la fuente de frecuencias de corriente que representará a las luminarias SAP de 400 W, dentro del panel de inventario de equipos se da clic derecho en 'Fuente de frecuencias', en el menú de propiedades que se abre a continuación es posible agregar nuevas fuentes de frecuencias dando clic en el símbolo . Una vez agregada la nueva fuente de frecuencias se le asigna un nombre representativo, en el caso de la fuente de corriente para las luminarias SAP de 400 W se le asigna el nombre de LUM\_SODIO400W. Las fuentes de frecuencias que aparecerán con un visto verde a su izquierda serán las fuentes que se encuentren activas dentro de la red.



**Figura 3.16** Fuentes de frecuencias del estudio

[Elaboración propia, obtenida de CYME]

Dentro de las características de la fuente de frecuencias de corriente se pueden escoger las unidades de la magnitud de corriente ya sea en amperios o en porcentaje de la magnitud de la corriente de frecuencia fundamental, se escoge la opción en porcentaje y se ingresan los datos obtenidos en la fase de medición en el laboratorio, correspondientes a las luminarias SAP 400 W (Tabla 3.7).

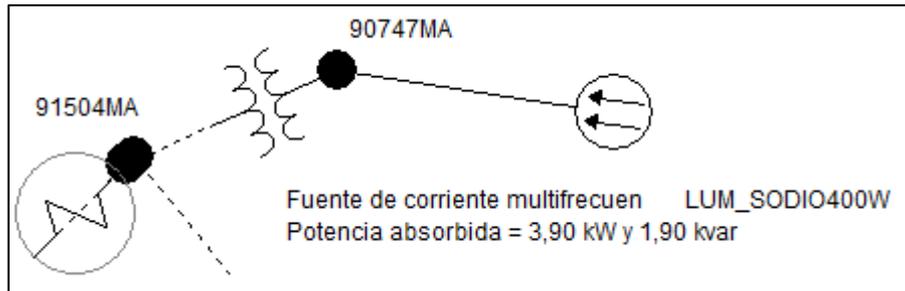


**Figura 3.17** Características de la fuente de frecuencias LUM\_SODIO 400W en CYME  
 [Elaboración propia, obtenida de CYME]

Se ingresan únicamente los datos de los armónicos de orden impar pues los armónicos de orden par presentan magnitudes muy pequeñas y considerando la precisión de los equipos pueden ser despreciados. Los armónicos impares se ingresan hasta el orden 13 ya que a partir de este orden las corrientes armónicas no sobrepasan el 0,6 % de la corriente de entrada medida (ver Tabla 3.7) y de acuerdo a la norma IEC 61000-3-2 pueden ser despreciadas.

Los ángulos de cada orden armónico fueron medidos únicamente con el equipo SONEL y se ingresan de igual forma hasta el orden armónico 13.

Una vez creada la fuente de corriente armónica se la coloca en lugar de la carga concentrada conectada al secundario del transformador en el nodo 90747MA como se observa en la Figura 3.18.



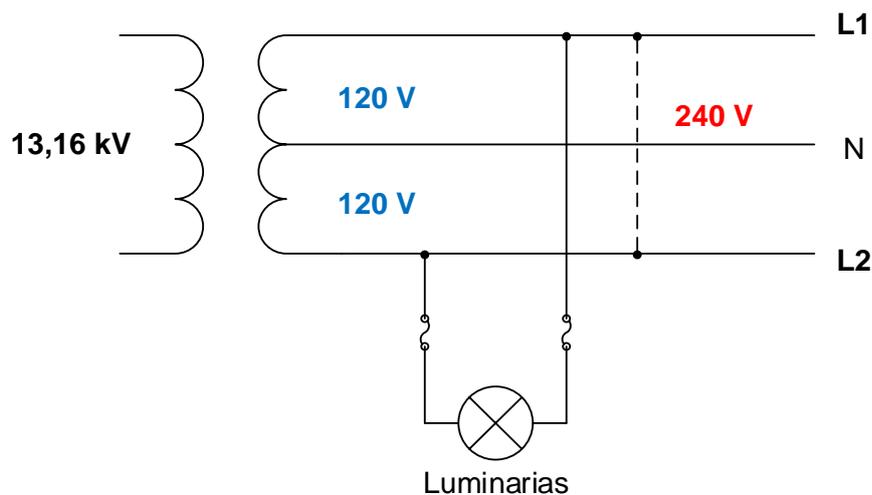
**Figura 3.18** Fuente de corriente armónica colocada en el secundario del transformador No. 41435, Nodo 90747MA [Elaboración propia, obtenida de CYME]

Dando doble clic sobre la fuente armónica de corriente se accede a la ventana de características de la fuente donde se coloca el valor de potencia activa y reactiva que absorbe la fuente armónica de corriente. Estos valores se colocan de acuerdo a los datos de medición en campo realizados por la EEQ.



**Figura 3.19** Medición del Transformador No. 41435  
[Fuente EEQ, obtenida de foto digital]

Los datos obtenidos por la EEQ fueron medidos en el secundario del transformador entre línea y neutro. El transformador No. 41435 es un transformador monofásico con sistema de 3 hilos en bajo voltaje por lo que se debe considerar que, si bien los resultados están dados entre cada línea y neutro, el total de las luminarias se conectan entre las líneas L1-L2 a un voltaje de 240 V como se muestra en la Figura 3.20 y la potencia total consumida será dos veces los valores mostrados en la Tabla 3.16.



**Figura 3.20** Transformador monofásico sistema de 3 hilos [Elaboración propia]

La Tabla 3.16 resume los valores promedio de distorsión armónica, potencia y corriente, calculados usando los datos de medición en campo de la EEQ.

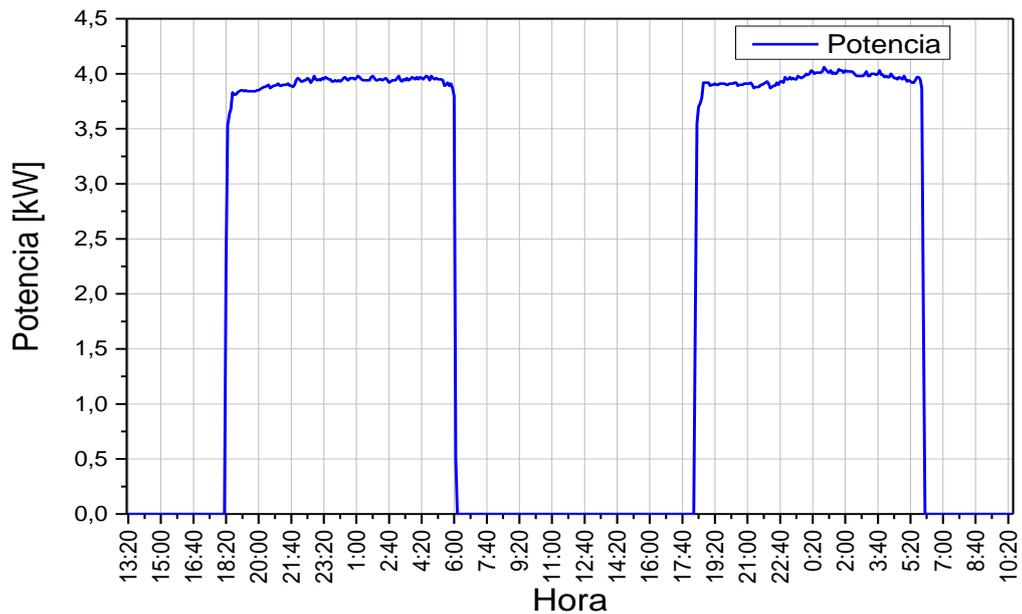
**Tabla 3.16** Valores promedio L2-N medidos en el transformador No. 41435

Período	THDV [%]	THDI [%]	Potencia Activa [kW]	Potencia Reactiva [kVAr]	Corriente [A]
Diurno	1,7	0	0	0	0
Nocturno	1,9	20,4	3,9	1,9	36,8

Si bien la potencia total será  $3,9 \text{ kW} \times 2$  es decir  $7,8 \text{ kW}$  (20 luminarias de  $400 \text{ W}$ ), en el flujo de armónicos realizado en el software de simulación CYME solo se consideran los valores línea-neutro para el cálculo de armónicos de corriente, por lo que se ingresan solamente los datos de potencia de la Tabla 3.16 obtenidos entre L2-N, con el fin de obtener los valores de THDV y THDI medidos en el transformador.

Las luminarias son encendidas alrededor de las 18:15 por lo que los resultados fueron clasificados en periodos diurno y nocturno, considerando al periodo diurno como el tiempo en que las luminarias están apagadas.

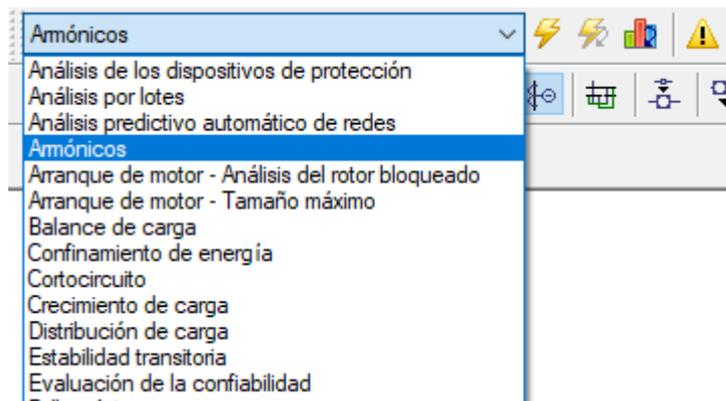
El tipo de luminarias SAP conectadas al transformador de acuerdo a sus etiquetas son de doble nivel de potencia, sin embargo, los resultados obtenidos de medición demuestran que no se observa este cambio de potencia como lo suelen tener las luminarias 2P a partir de las 23:30.



**Figura 3.21** Potencia medida en el transformador No. 41435 [Elaboración propia]

Como se observa en la Figura 3.21 la potencia se mantiene prácticamente constante durante el período nocturno, por ende, no existe control de doble nivel de potencia, por lo que en la simulación se considera una potencia constante de  $P = 3,9 \text{ kW}$  y  $Q = 1,9 \text{ kVAr}$ .

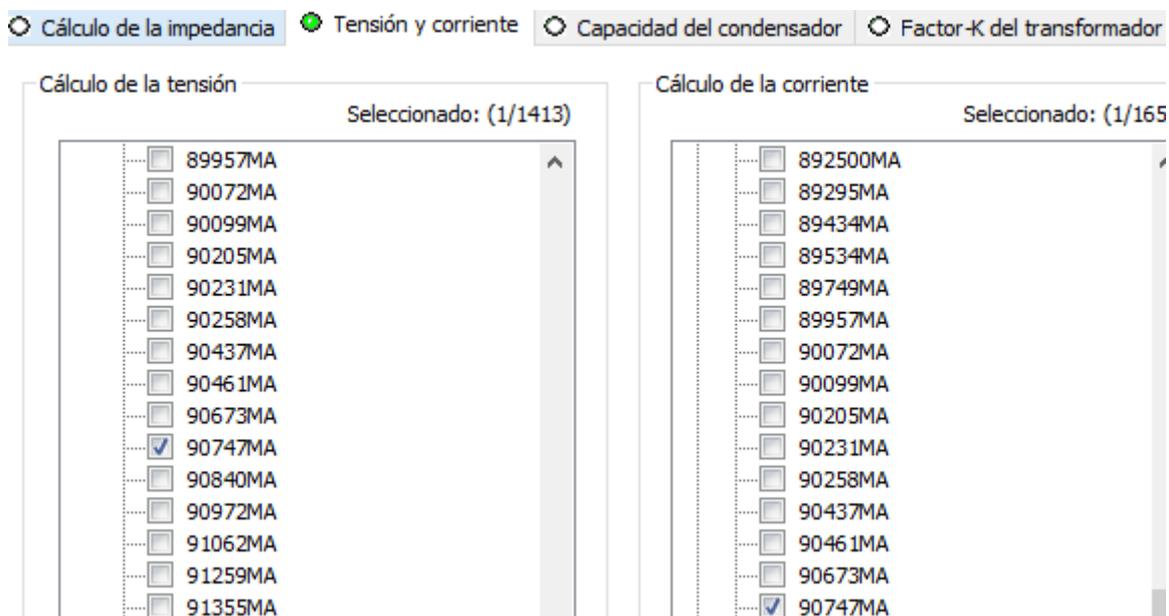
Para ejecutar el barrido de frecuencia se escoge la opción 'Armónicos' en la barra de simulación y se da clic en ejecutar ⚡.



**Figura 3.22** Opciones de la barra de simulación [Elaboración propia, obtenida de CYME]

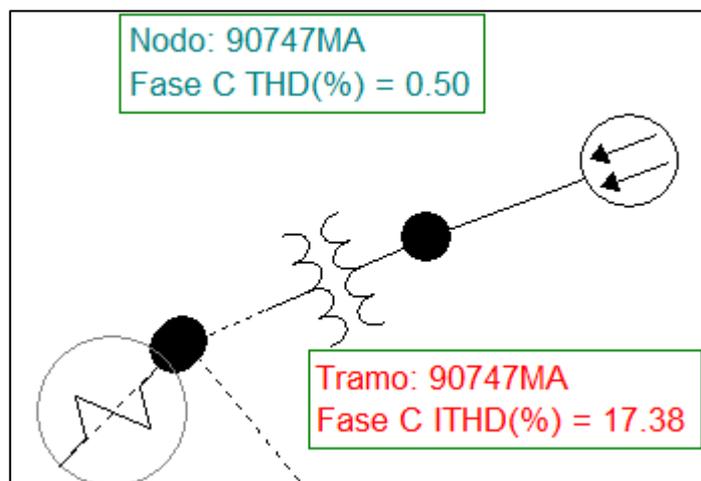
En la ventana que se abre a continuación, se pueden establecer los ajustes de la simulación, así como las opciones de cálculo de distorsión armónica de voltaje y corriente, cálculo del factor-k en transformadores, dimensionamiento de condensadores y filtros, y cálculo de la impedancia. Dentro de la pestaña 'Tensión y corriente' se escoge el nodo

(90747MA) para el cálculo de la distorsión armónica de voltaje y el tramo o línea (90747MA) para el cálculo de la distorsión armónica de corriente, como se muestra en la Figura 3.23.



**Figura 3.23** Ajustes de simulación análisis armónico de tensión y corriente [Elaboración propia, obtenida de CYME]

Una vez seleccionados el nodo y línea para el análisis armónico se da clic en 'Ejecutar' con lo cual se obtienen los resultados mostrados a continuación.



**Figura 3.24** THD V y THD I simulados [Elaboración propia, obtenida de CYME]

Como se observa en la Figura 3.24 los resultados obtenidos en la simulación varían con los resultados de medición resumidos en la Tabla 3.16, para corregir esta variación se debe tomar en cuenta que existe un remanente de distorsión armónica de voltaje o distorsión de fondo que se refleja en el período diurno aun cuando todas las luminarias se encuentran

apagadas tal como que se muestra en la Tabla 3.16. Para simular este efecto se coloca una fuente armónica de voltaje del lado primario del transformador.

Las magnitudes de la fuente armónica de voltaje se ingresan de acuerdo a los datos de medición de la Tabla 3.17, donde se resumen los valores promedios de magnitud armónica de voltaje, calculados usando los datos de medición en campo de la EEQ. A partir del orden armónico 18 las magnitudes son 0.

**Tabla 3.17** Valores promedio de magnitud armónica de voltaje (%) medidos en el transformador período diurno

Orden Armónico																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
100	0	1,35	0	0,75	0	0,29	0	0,68	0	0,35	0	0,17	0	0,24	0	0,02

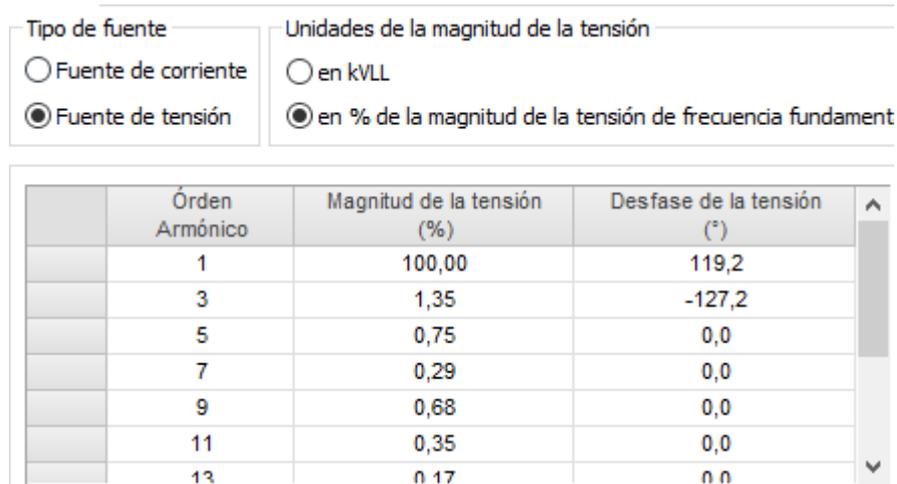
Los ángulos por orden armónico no se conocen, por lo que se decide tomar valores similares al de los ángulos calculados por medio de simulación en el nodo del primario del transformador donde se va a colocar la fuente armónica de voltaje. Para esto se añade el nodo 91504MA en el cálculo de tensión y se obtienen los siguientes resultados.

**Tabla 3.18** Resumen del reporte de tensión armónica simulado en el nodo 91504MA

Frecuencia [Hz]	Modulo [V]	Angulo [°]
60	13 097,09	119,2
120	0,01	-42,4
180	0,79	-127,2
240	0,01	-161,5
300	0,51	106,3
360	0,01	77,5

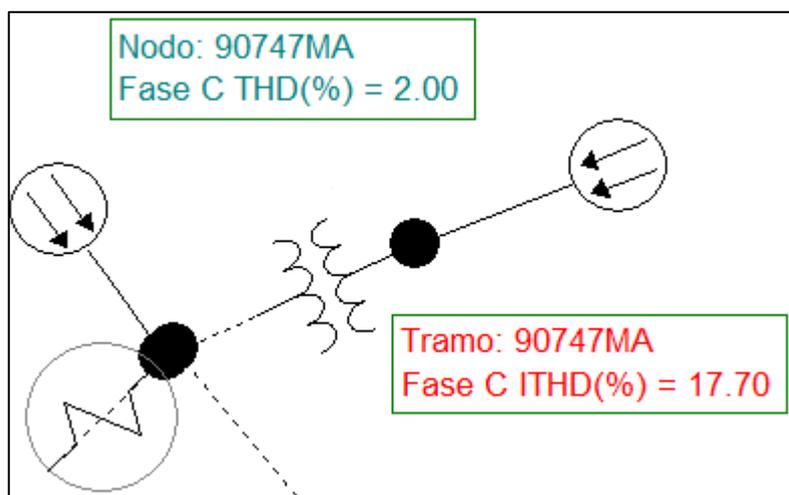
Considerando que la magnitud armónica de voltaje medida para los armónicos de orden par es cero, solo se consideran los ángulos de los armónicos impares.

Con los valores de magnitud (Tabla 3.17) y ángulo (Tabla 3.18) se procede a crear la fuente armónica de voltaje, los ángulos se consideran únicamente para la componente fundamental y el tercer armónico por ser el de mayor magnitud.



**Figura 3.25** Características de la fuente armónica de voltaje [Elaboración propia, obtenida de CYME]

Con la adición de la fuente armónica de voltaje se ejecuta el barrido de frecuencia y se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3.26.



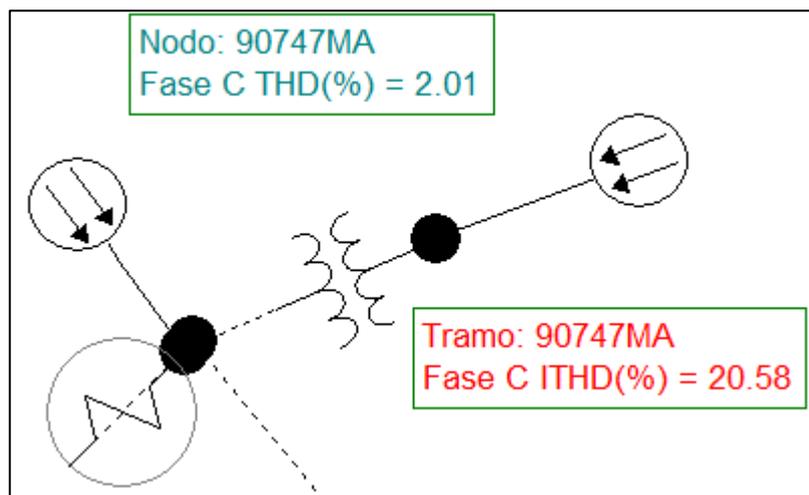
**Figura 3.26** THD V y THD I simulados [Elaboración propia, obtenida de CYME]

La Figura 3.26 muestra que el resultado obtenido de THD de voltaje (2 %) es bastante similar al medido (ver Tabla 3.16), sin embargo, el valor de distorsión de corriente (17,7 %) sigue siendo muy bajo, por lo que se ajusta el valor del ángulo del tercer armónico hasta obtener un resultado similar al medido.

El valor del ángulo que más se ajusta para la obtención de valores de THD similares a los medidos es de -121,7 °, con este valor se obtienen los siguientes resultados.

General		Símbolo	
Tipo de fuente		Unidades de la magnitud de la tensión	
<input type="radio"/> Fuente de corriente	<input type="radio"/> en kVLL		
<input checked="" type="radio"/> Fuente de tensión	<input checked="" type="radio"/> en % de la magnitud de la tensión de frecuencia fundament		
Orden Armónico	Magnitud de la tensión (%)	Desfase de la tensión (°)	
1	100,00	119,2	
3	1,35	-121,7	
5	0,75	0,0	
7	0,29	0,0	
9	0,68	0,0	
11	0,35	0,0	
13	0,17	0,0	

**Figura 3.27** Características de la fuente armónica de voltaje ajustada [Elaboración propia, obtenida de CYME]



**Figura 3.28** THD V y THD I simulados [Elaboración propia, obtenida de CYME]

Como se observa en la Figura 3.28 los resultados obtenidos se asemejan mucho a los medidos por la EEQ en el secundario del transformador (Tabla 3.16). Los errores entre los valores medidos y simulados se muestran en la Tabla 3.19.

**Tabla 3.19** Parámetros eléctricos medidos y simulados en el período nocturno

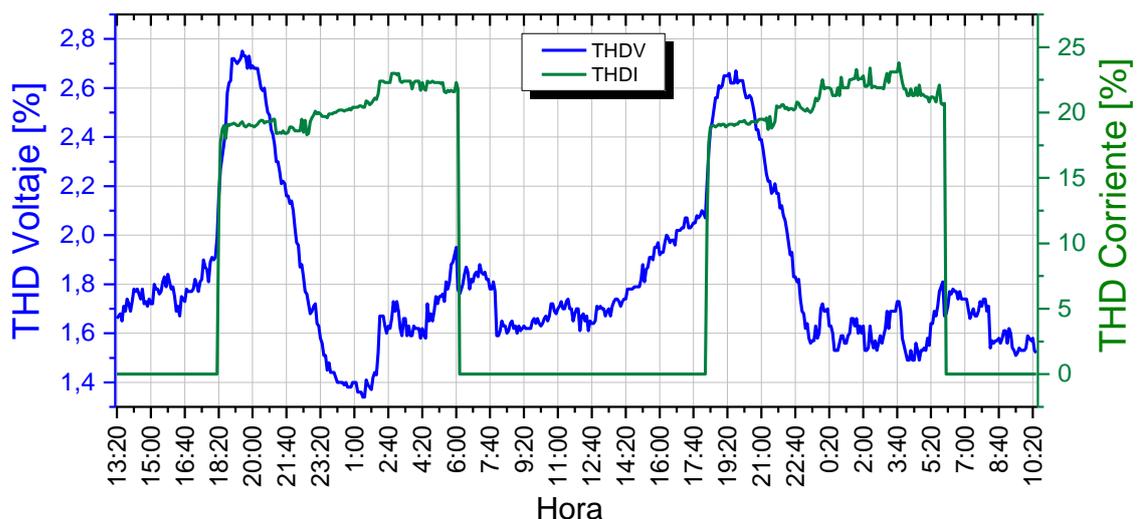
	Valor medido	Valor simulado	Error %
THD V [%]	1,9	2	5 %
THD I [%]	20,4	20,6	1 %
P [kW]	3,9	3,9	0 %
Q [kVAr]	1,9	1,9	0 %
I [A]	36,8	34,6	6 %

Los errores que se observan en la simulación se deben a que se desconocen los ángulos reales de cada orden armónico de la señal de voltaje, además, que al considerar una fuente armónica de corriente fija se omite el efecto que la señal de voltaje distorsionada podría tener en el contenido armónico de las luminarias. A pesar de esto, los valores obtenidos en la simulación son bastante similares a los medidos en la red real. La red por si sola presenta un remanente de distorsión armónica de voltaje bajo, de alrededor del 2 % en promedio, que se pudo compensar incluyendo una fuente armónica de voltaje fija.

En la práctica esta fuente de voltaje armónica no es fija y cambiará de acuerdo al comportamiento de la red. La Figura 3.29 muestra el comportamiento del THD de voltaje y corriente medidos en la red. En la figura se observa como a la misma hora en que se encienden las luminarias se genera un crecimiento del THD de voltaje, sin embargo, el THDV no solo depende de las luminarias ya que incluso cuando estas están encendidas, este vuelve a caer generando un pequeño aumento en la distorsión armónica de corriente.

La distorsión de la señal de voltaje de la red, por ende, influye en el contenido armónico de la corriente, dependiendo de su magnitud y ángulo la distorsión armónica de corriente puede disminuir o aumentar.

En la simulación, los resultados obtenidos concuerdan con los medidos en la práctica, tomando en cuenta que las fuentes armónicas de voltaje y corriente fijas dan resultados equivalentes a los valores promedio medidos en el período nocturno (Tabla 3.16).

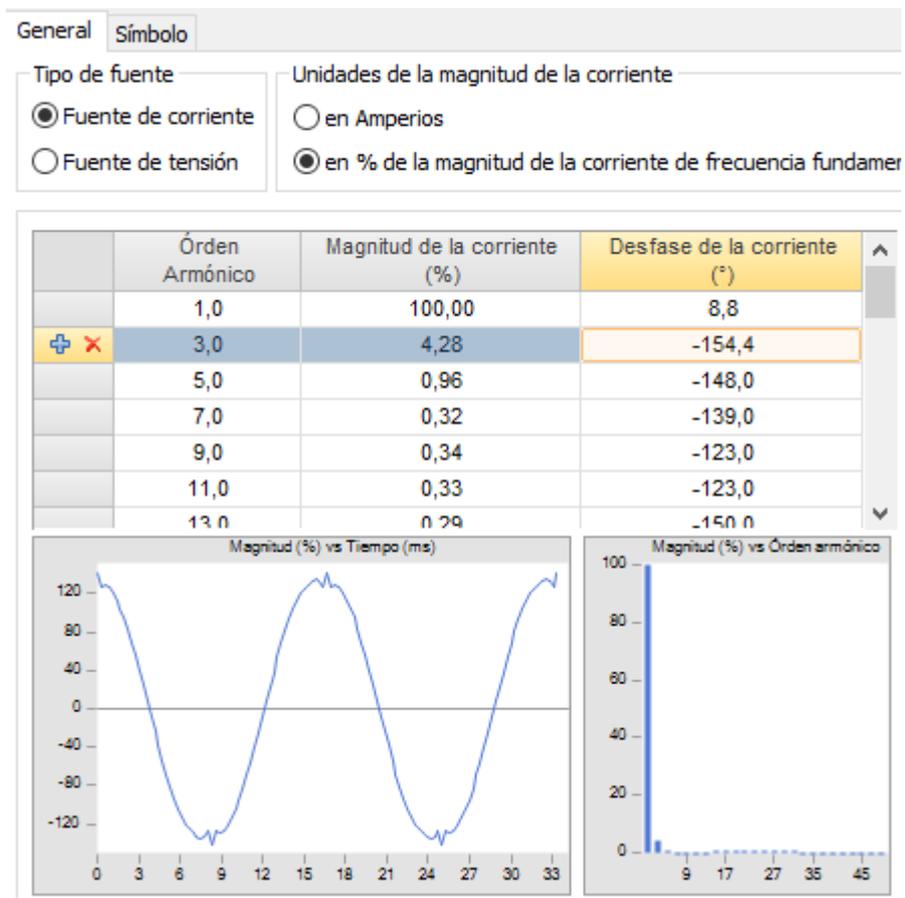


**Figura 3.29** THD de voltaje y corriente medidos en el secundario del transformador  
[Elaboración propia]

Una vez creado el sistema de prueba bajo las condiciones actuales de funcionamiento, y respaldado en base a los datos de medición en campo, se procede a realizar el reemplazo de las luminarias SAP de 400 W por las luminarias LED de 150 W.

Se coloca la fuente armónica de corriente LUM\_LED150W creada de igual forma que la fuente armónica SAP, pero con los datos de contenido armónico medidos bajo condiciones de laboratorio en la luminaria LED 150 W (Tabla 3.8).

Los datos ingresados en la fuente armónica de corriente LUM\_LED150W se muestran en la Figura 3.30.

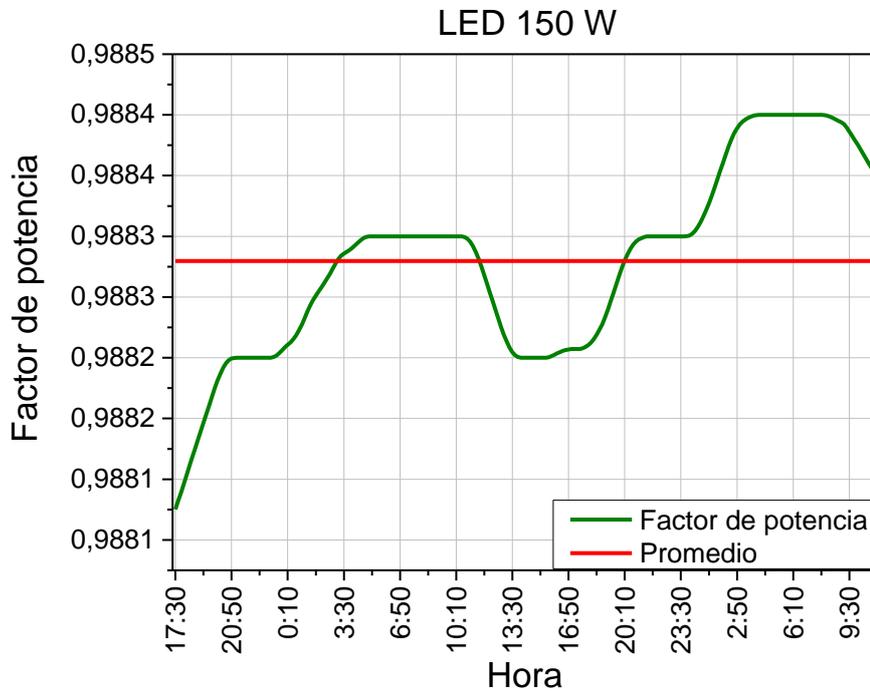


**Figura 3.30** Características de la fuente armónica LUM\_LED 150W [Elaboración propia, obtenida de CYME]

Para el cálculo de la potencia de consumo de las luminarias LED de 150 W se considera el valor de factor de potencia medido bajo condiciones de laboratorio de 0,988 (ver Figura 3.31) y la potencia reactiva se calcula con la siguiente ecuación:

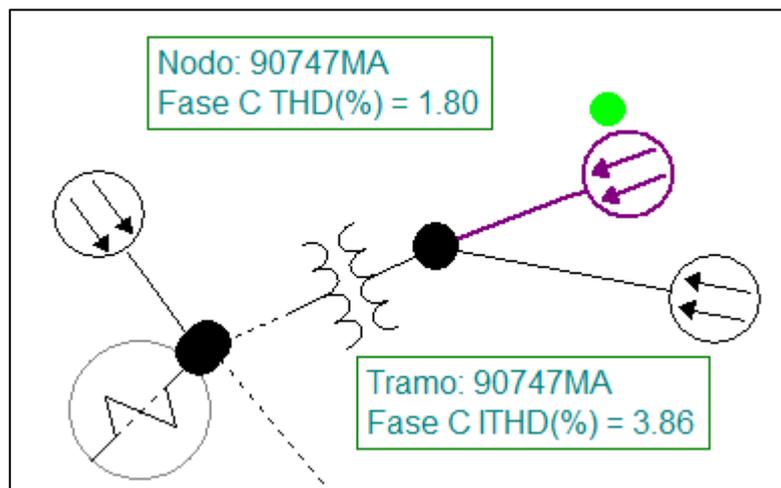
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.2)$$

$$Q = \sqrt{\left(\frac{1,5}{0,9888}\right)^2 - (1,5)^2} = 0,2 \text{ kVAr}$$



**Figura 3.31** Factor de potencia en la luminaria LED 150 W, escenario SC [Elaboración propia]

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.32 y como se puede observar los factores de distorsión armónica de voltaje y corriente son menores a los calculados con las luminarias de sodio.



**Figura 3.32** THD V y THD I simulados con luminarias LED 150 W [Elaboración propia, obtenida de CYME]

### 3.3.3 LUMINARIA SAP 400 W VERSUS LED 150 W

La Tabla 3.20 resume algunos de los parámetros más importantes obtenidos en la simulación en CYME.

**Tabla 3.20** Parámetros calculados en la simulación

	10 luminarias	
	SAP 400 W	LED 150 W
THD V [%]	2	1,8
THD I [%]	20,6	3,9
P [kW]	3,9	1,5
Q [kVAr]	1,9	0,2
I [A]	34,6	12,2

De acuerdo a los resultados de la Tabla 3.20 las luminarias SAP de 400 W con balasto electromagnético producen un THD de corriente 5 veces mayor que la luminaria LED de 150 W, sin embargo, no todas las luminarias LED  $\leq 150$  W generan un contenido armónico de corriente bajo como el medido en laboratorio y calculado en la simulación. Dependiendo de la marca y tipo de driver que emplee la luminaria LED, el contenido armónico puede ser mayor o menor. Luminarias LED de diferentes marcas de 120 W y 60 W medidas en el laboratorio llegaron a producir hasta un 15 % y 8 % de THDI respectivamente (ver en ANEXO F), por lo que escoger la marca de las luminarias LED es realmente importante, tomando en cuenta las diferencias en el contenido armónico de corriente que estas pueden presentar. El tipo de luminaria LED de 150 W utilizada en este estudio tiene un contenido armónico de corriente (4,7 %) y factor de potencia (0,988) bastante buenos.

Los resultados de la Tabla 3.20 muestran que al realizar el reemplazo de las luminarias SAP por las luminarias LED se consigue no solo reducir el contenido armónico de corriente sino también ahorrar 2,4 kW en potencia. Si se considera el total de luminarias instaladas en la vía (89 luminarias) se ahorrarían 21,4 kW. Al reducirse la corriente además se podría ahorrar en capacidad de conductores y el efecto en la distorsión de voltaje será menor.

El contenido armónico de voltaje se mantiene casi constante comparando el uso de los dos tipos de luminarias, como se analizó en la fase de modelación la mayor parte del contenido armónico depende de la red donde se encuentran instaladas las luminarias, y si bien las luminarias aportan a este contenido armónico de voltaje el mayor porcentaje corresponde a la distorsión armónica de fondo.

### 3.3.4 APLICACIÓN DE LOS LÍMITES

El software CYME permite evaluar los resultados de acuerdo a los límites establecidos en el estándar IEEE Std 519-1992.

La regulación No. ARCONEL 005/18 adopta los límites del estándar IEEE Std 519-2014 por lo que para el análisis se deberá tomar en cuenta las actualizaciones del estándar tal como se muestran en la Tabla 1.8 y Tabla 1.9.

Los límites del estándar y la regulación se aplican en el punto de acoplamiento común PCC, si bien el transformador bajo análisis solo alimenta a cargas de iluminación, debido a su capacidad (25 kVA) es muy probable que en un futuro se emplee para dar servicio a usuarios en la zona, por lo cual, se toman a modo de referencia los límites establecidos en el estándar para el análisis de los resultados obtenidos.

Límites de distorsión de tensión

Estándar IEEE 519-1992  
 Límites de distorsión de tensión definidos por el usuario

Tensión (kV - LL)		IHD*	THD*
>	<=		
0	69	3.0	5.0
69	161	1.5	2.5
161		1.0	1.5

IHD Distorsión armónica individual  
 THD Distorsión armónica total  
 \* En porcentaje de la tensión en la frecuencia fundamental nominal

---

Límites de distorsión de corriente

Estándar IEEE 519-1992  
 Límites de distorsión de corriente definidos por el usuario

Isc/I L	Distorsión de corriente armónica máxima en porcentaje de I L					TDD
	Orden armónico individual (Armónicos impares)					
	h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Los armónicos pares son limitados a 25% de los límites de los armónicos impares arriba  
 Isc = Corriente máxima de cortocircuito a PCC  
 I L = Corriente de carga a la demanda máxima (componente de frecuencia fundamental) a

**Figura 3.33** Límites de distorsión de voltaje y corriente en CYME [Elaboración propia, obtenido de CYME]

A continuación, se muestran los resultados del reporte de corriente y voltaje armónico ejecutados en el estudio.

**Tabla 3.21** Reporte corriente armónica en CYME usando luminarias SAP 400 W

Línea	Frec. [Hz]	Módulo I [A]	Angulo [°]	IHD [%]
90747MA-C	60	33,91	93,4	0
90747MA-C	180	6,57	-21,7	<b>19,38</b>
90747MA-C	300	2,02	-161	5,95
90747MA-C	420	1,11	72,4	3,26
90747MA-C	540	0,43	-68,8	1,26
90747MA-C	660	0,15	170,5	0,43
90747MA-C	780	0,17	65,4	0,51
90747MA-C	900	0,1	164,6	0,29
90747MA-C	1 020	0,05	40,9	0,2
90747MA-C	1 140	0,07	-81,4	0,2
90747MA-C	1 260	0,07	156,4	0,2
90747MA-C	1 380	0,02	34,1	0,07
90747MA-C	1 500	0,03	-88,2	0,09
90747MA-C	1 620	0,05	149,6	0,15
90747MA-C	1 740	0,02	27,3	0,06

**Tabla 3.22** Parámetros de corriente calculados en la línea

No. Línea	Isc/IL (60 Hz)	TDD (%)
90747MA-C	6 742,2	<b>20,6</b>

**Tabla 3.23** Reporte de voltaje armónico en CYME usando luminarias SAP 400 W

ID de nodo	Frec. [Hz]	Módulo V [V]	Angulo [°]	IHD [%]
90747MA-C	60	137,16	118,9	0
90747MA-C	180	2,38	-124	1,7
90747MA-C	300	0,88	-141,4	0,6
90747MA-C	420	0,28	74,9	0,2
90747MA-C	540	0,84	-10,8	0,6
90747MA-C	660	0,45	-130,9	0,3
90747MA-C	780	0,21	93,9	0,2
90747MA-C	900	0,34	-3,5	0,3
90747MA-C	1 020	0,04	-88,9	0
90747MA-C	1 140	0,04	-172,6	0
90747MA-C	1 260	0,05	64	0
90747MA-C	1 380	0,02	-58,7	0
90747MA-C	1 500	0,02	-179,3	0
90747MA-C	1 620	0,04	58,7	0
90747MA-C	1 740	0,02	-63,5	0

**Tabla 3.24** Distorsión armónica total de voltaje

ID del nodo	THD [%]
90747MA-C	2

Considerando que  $I_{sc}/I_L > 1\ 000$  (ver Tabla 3.22), el reporte de corriente armónica indica que la distorsión armónica individual (IHD) del tercer armónico de corriente y el TDD se encuentran fuera de los límites establecidos del 15 % y 20 % respectivamente. Mientras que el reporte de voltaje armónico indica que tanto las componentes individuales de cada armónico como la distorsión armónica total se encuentran dentro de los límites establecidos del 5 % y 8 %.

**Tabla 3.25** Reporte corriente armónica en CYME usando luminarias LED 150 W

Línea	Frec. [Hz]	Módulo I [A]	Angulo [°]	IHD [%]
90747MA-C	60	12,24	111,9	0
90747MA-C	180	0,43	90	3,51
90747MA-C	300	0,02	90	0,19
90747MA-C	420	0	90	0,02
90747MA-C	540	0,05	59,1	0,38
90747MA-C	660	0,04	-90	0,37
90747MA-C	780	0,03	144,3	0,24
90747MA-C	900	0,06	172,6	0,49
90747MA-C	1 020	0,05	42,4	0,43
90747MA-C	1 140	0,07	-77,5	0,55
90747MA-C	1 260	0,05	160,7	0,43
90747MA-C	1 380	0,06	38,8	0,50
90747MA-C	1 500	0,05	-83,1	0,40
90747MA-C	1 620	0,05	155,1	0,41
90747MA-C	1 740	0,04	33,3	0,35
90747MA-C	1 860	0,04	-88,6	0,34
90747MA-C	1 980	0,03	149,6	0,28
90747MA-C	2 100	0,03	27,7	0,27
90747MA-C	2 220	0,03	-94,2	0,25
90747MA-C	2 340	0,03	144	0,24
90747MA-C	2 460	0,03	22,2	0,22
90747MA-C	2 580	0,03	-99,7	0,21
90747MA-C	2 700	0,02	138,5	0,20
90747MA-C	2 820	0,03	16,6	0,23
90747MA-C	2 940	0,02	-105,2	0,19

**Tabla 3.26** Parámetros de corriente calculados en la línea

No. Línea	Isc/IL (60 Hz)	TDD (%)
90747MA-C	18 673,11	3,9

**Tabla 3.27** Reporte de voltaje armónico en CYME usando luminarias LED 150 W

ID de nodo	Frec. [Hz]	Módulo V [V]	Angulo [°]	IHD [%]
90747MA-C	60	137,73	119,1	0
90747MA-C	180	1,89	-122,9	1,37
90747MA-C	300	1,04	-124,8	0,76
90747MA-C	420	0,41	113,6	0,29
90747MA-C	540	0,95	-7,4	0,69
90747MA-C	660	0,49	-129,5	0,36
90747MA-C	780	0,25	107	0,18
90747MA-C	900	0,33	-7,1	0,24
90747MA-C	1 020	0,04	-85,4	0,03
90747MA-C	1 140	0,04	-168,7	0,03
90747MA-C	1 260	0,04	68,3	0,03
90747MA-C	1 380	0,04	-534	0,03
90747MA-C	1 500	0,04	-174,2	0,03
90747MA-C	1 620	0,04	64,2	0,03
90747MA-C	1 740	0,04	-57,6	0,03
90747MA-C	1 860	0,04	-179,6	0,03
90747MA-C	1 980	0,04	58,1	0,03
90747MA-C	2 100	0,04	-64,8	0,03
90747MA-C	2 220	0,04	173,2	0,03
90747MA-C	2 340	0,04	52,3	0,03
90747MA-C	2 460	0,04	-68,8	0,02
90747MA-C	2 580	0,03	169,7	0,02
90747MA-C	2 700	0,03	48	0,03
90747MA-C	2 820	0,04	-73,8	0,03
90747MA-C	2 940	0,04	164,4	0,03

**Tabla 3.28** Distorsión armónica total de voltaje

ID del nodo	THD [%]
90747MA-C	1,8

Al emplear las luminarias LED los resultados del reporte de corriente y voltaje armónicos se encuentran muy por debajo de los límites establecidos por el estándar IEEE Std 519-2014. Ningún parámetro excede los límites.

### 3.3.5 IMPEDANCIA VERSUS FRECUENCIA

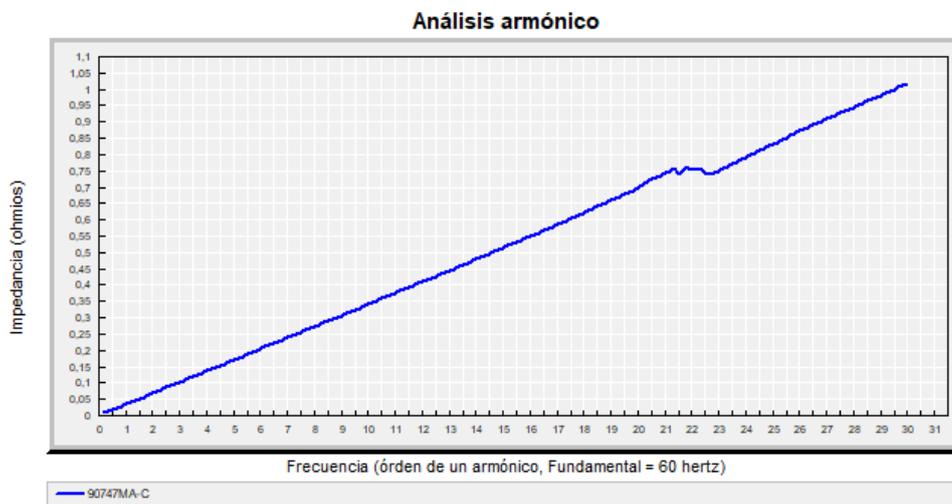
Entre las opciones de cálculo que permite realizar el software CYME se encuentra el barrido de frecuencia para el cálculo de la impedancia en función de la frecuencia.

El voltaje armónico ( $V_h$ ) en un nodo del sistema dependerá de la corriente armónica ( $I_h$ ) y de la impedancia ( $Z_h$ ).

$$V_h = I_h \times Z_h \quad (3.3)$$

Por lo que uno de los métodos de mitigación de armónicos consiste en reducir el valor de la impedancia para un orden armónico específico por medio de filtros provocando resonancia entre las reactancias inductivas y capacitivas con el objetivo de reducir o eliminar ciertos componentes armónicos, sobre todo aquellos de mayor magnitud.

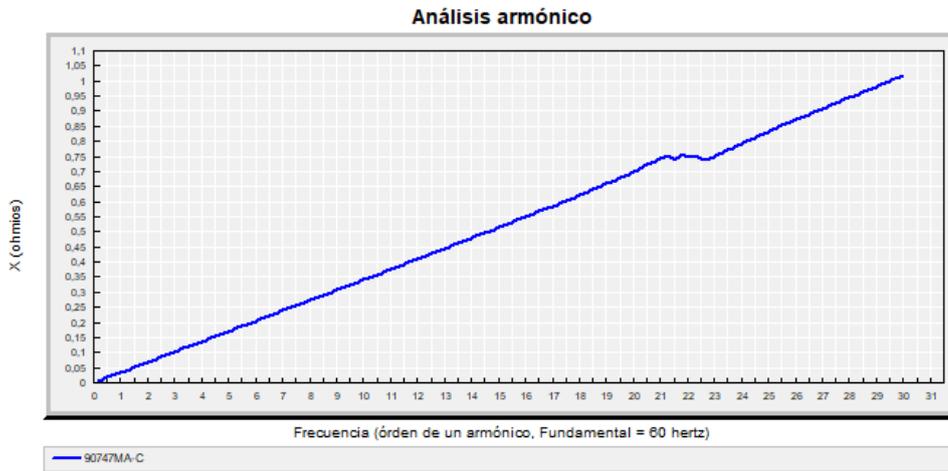
Las gráficas permiten conocer el comportamiento de la red en función de la frecuencia. De acuerdo a la Figura 3.34 la impedancia en el nodo 90747MA-C (ver Figura 3.14) tiene un comportamiento lineal con la frecuencia, con valores bajos para los armónicos de menor orden.



**Figura 3.34** Impedancia en el nodo 90747MA-C [Elaboración propia, obtenido de CYME]

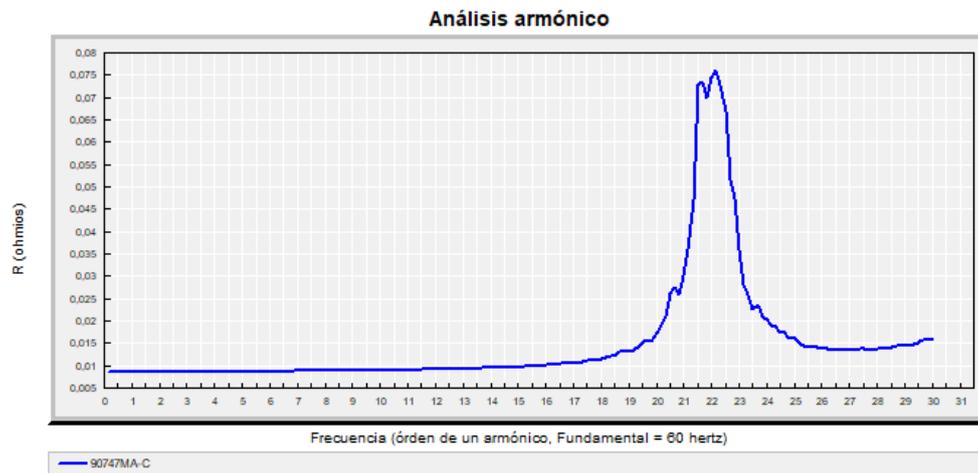
A la frecuencia fundamental ( $h = 1$ ) los sistemas de potencia son principalmente inductivos, la reactancia inductiva ( $X_h$ ) cambia linealmente con la frecuencia y se encuentra determinada por la relación [25]:

$$X_h = h \times X_1 \quad (3.4)$$



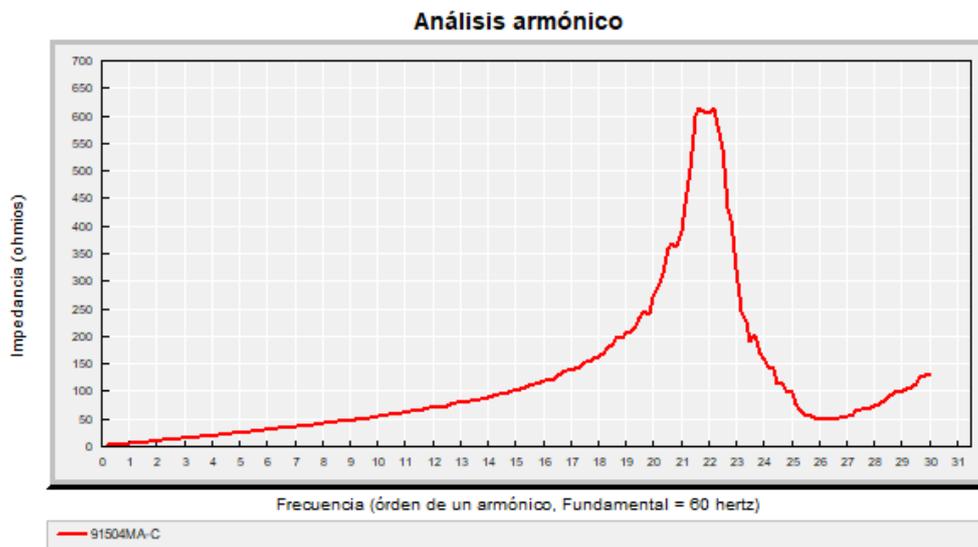
**Figura 3.35** Reactancia en el nodo 90747MA-C  
[Elaboración propia, obtenido de CYME]

Como se observa en la Figura 3.36 la resistencia tiene valores bajos y su valor permanece casi constante hasta el orden armónico 19 a partir del cual empieza a crecer exponencialmente, alrededor del orden armónico 22 se observa un pico y posteriormente el valor de la resistencia decrece. En general  $R \ll X$  por lo que la mayor parte la impedancia se representa por el valor de la reactancia equivalente.



**Figura 3.36** Resistencia en el nodo 90747MA-C  
[Elaboración propia, obtenido de CYME]

Los bajos valores de impedancia de los armónicos de orden bajo, evita que exista una mayor caída de voltaje a través de la impedancia aún con la presencia de corrientes armónicas.

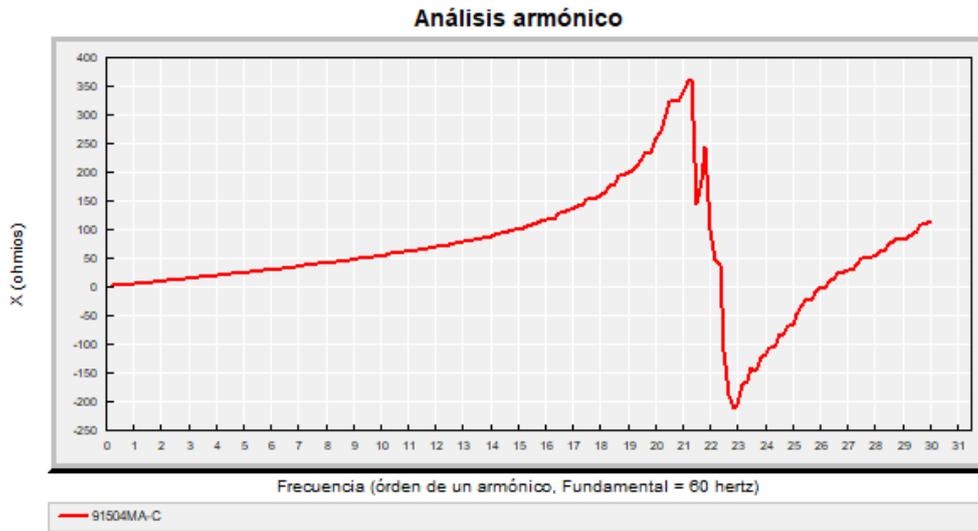


**Figura 3.37** Impedancia en el nodo 91504MA-C  
[Elaboración propia, obtenido de CYME]

La Figura 3.37 muestra la impedancia obtenida en el nodo 91504MA-C (ver Figura 3.14) en el lado de medio voltaje del transformador, en la cual se puede observar un pico (resonancia paralela) y valle (resonancia serie) en el comportamiento de la impedancia.

Los cálculos en los dos nodos fueron realizados usando el modelo PI nominal para el modelo armónico de líneas y cables, e incluyendo el efecto peculiar o efecto piel. Al calcular la impedancia excluyendo el efecto peculiar, los picos en la reactancia y resistencia se reducen, mientras que usando el modelo R-L para líneas y cables los picos desaparecen y el comportamiento de la impedancia es completamente lineal. Para las líneas de distribución se puede emplear el modelo serie R-L, sin embargo, debido a que el efecto capacitivo varía con la frecuencia se puede considerar su efecto escogiendo el modelo PI nominal, como en este caso.

El efecto capacitivo de las líneas en función de la frecuencia se ve reflejado en los resultados mostrados en las figuras, especialmente del nodo 91504MA-C.



**Figura 3.38** Reactancia en el nodo 91504MA-C [Elaboración propia, obtenido de CYME]

La resonancia paralela aparece cuando la reactancia capacitiva  $X_c$  y la reactancia inductiva  $X_L$  del sistema se cancelan una a otra, la frecuencia a la que ocurre este fenómeno se denomina frecuencia de resonancia paralela ( $f_p$ ) y se expresa como:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (3.5)$$

Donde  $L$  es el valor de la inductancia y  $C$  el valor de la capacitancia. Durante el fenómeno de resonancia un pequeño valor de corriente armónica podría causar un gran valor de caída de voltaje a través de la impedancia de acuerdo con la Ecuación 3.3.

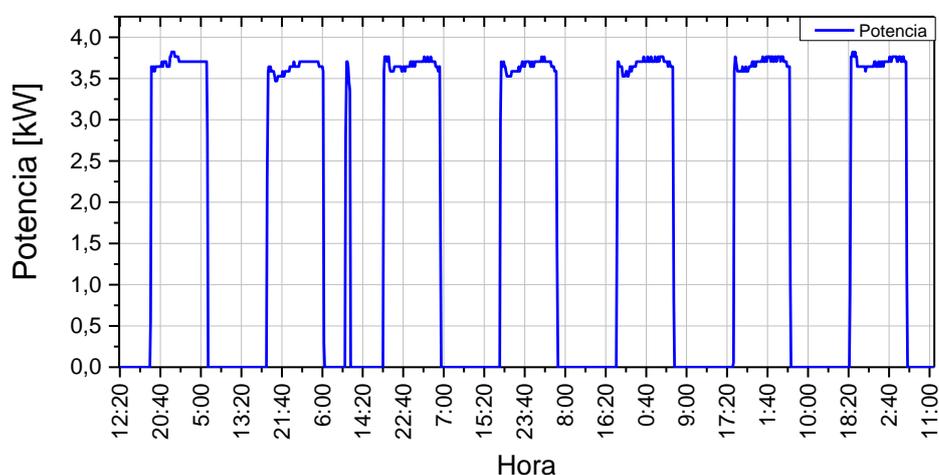
En la red de distribución bajo estudio, de acuerdo a la Figura 3.37, la resonancia se presenta en un orden armónico alto (h~22) por lo que el efecto de las cargas no lineales del secundario del transformador no será significativo, ya que la magnitud de los armónicos de orden alto como el 22 es pequeña. El efecto de los armónicos en el primario del transformador será incluso menor debido a la reducción de la magnitud de corriente.

El efecto de la resonancia paralela se puede magnificar si es que coinciden un valor de impedancia y magnitud de corriente armónica altos, es decir cuando ocurra resonancia a un orden armónico bajo y con máxima demanda.

### 3.3.6 COMPARACIÓN CON OTRAS REDES

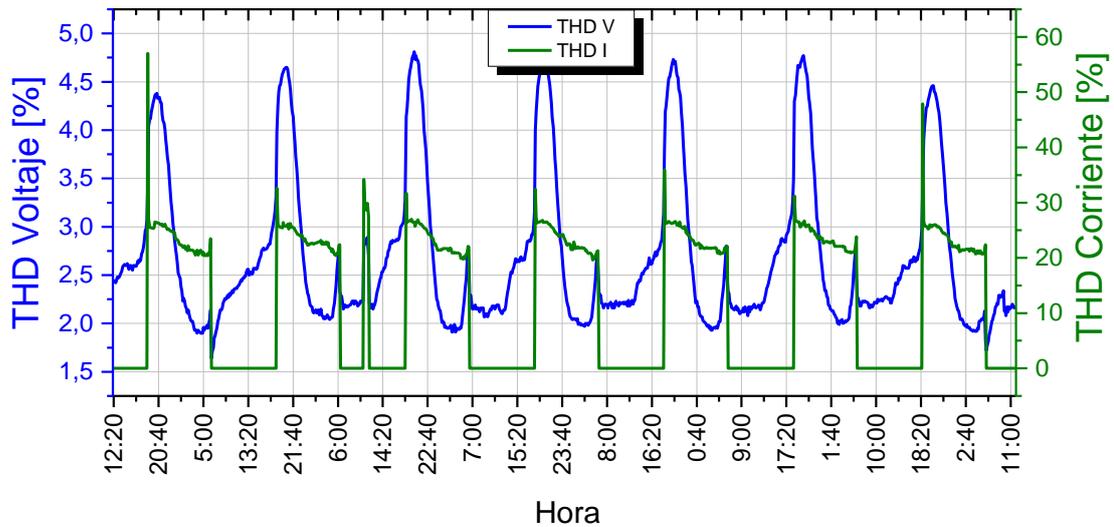
En esta sección se compara el comportamiento de la red bajo análisis con las mediciones realizadas en otros transformadores de distribución que alimentan a luminarias tipo SAP. El objetivo es encontrar similitudes para la aplicación de la metodología descrita en este trabajo. Para esto se analizan las mediciones realizadas por la EEQ en los transformadores No. 35522, 169643 y 44034.

El transformador No. 35522 de 15 kVA ubicado en el mercado Las Cuadras, se conecta al alimentador B de la subestación Eugenio Espejo (59B) y alimenta a 24 luminarias SAP de 150 W, 2 proyectores de sodio de 250 W y a 3 clientes residenciales.



**Figura 3.39** Potencia en el transformador No. 35522 [Elaboración propia]

La Figura 3.39 muestra el consumo de potencia del transformador en una semana, de acuerdo a la figura el consumo promedio nocturno alcanza los 3,7 kW, con un consumo mayoritario de las luminarias.



**Figura 3.40** THDV y THDI en el transformador No. 35522 [Elaboración propia]

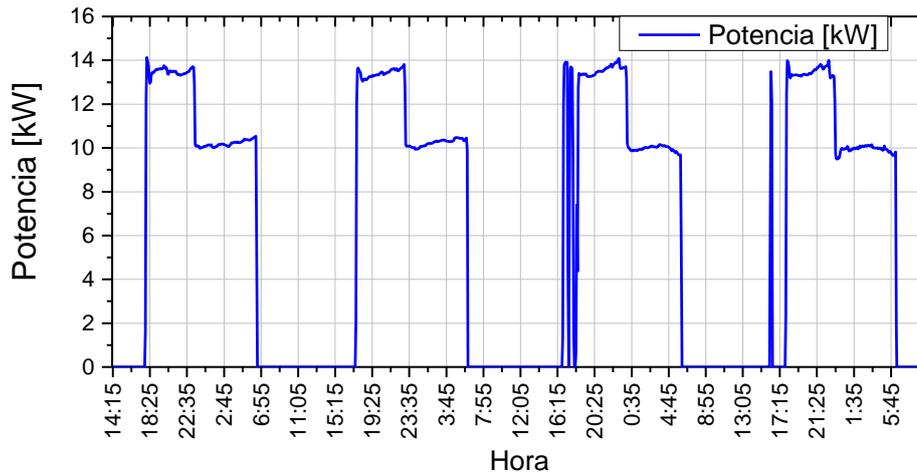
En la Figura 3.40 se observa que la distorsión armónica de voltaje promedio durante el día en el secundario del transformador es del 2,5 %, durante la noche supera el 4 %, mientras que en la madrugada decae hasta valores cercanos a los observados durante el día. Este comportamiento es bastante similar al observado en el transformador No. 41435, tal como se muestra en la Figura 3.29.

A partir de las 18:30, hora en que se encienden las luminarias, la distorsión armónica de corriente crece alcanzando un valor promedio del 23,3 % cercano al 20,4 % medido en el transformador No.41435 (ver Tabla 3.16).

La distorsión armónica de corriente producida por las cargas residenciales es prácticamente nula en el periodo que las luminarias están desconectadas, por otro lado, la distorsión armónica de voltaje está en constante cambio y nunca es igual a cero.

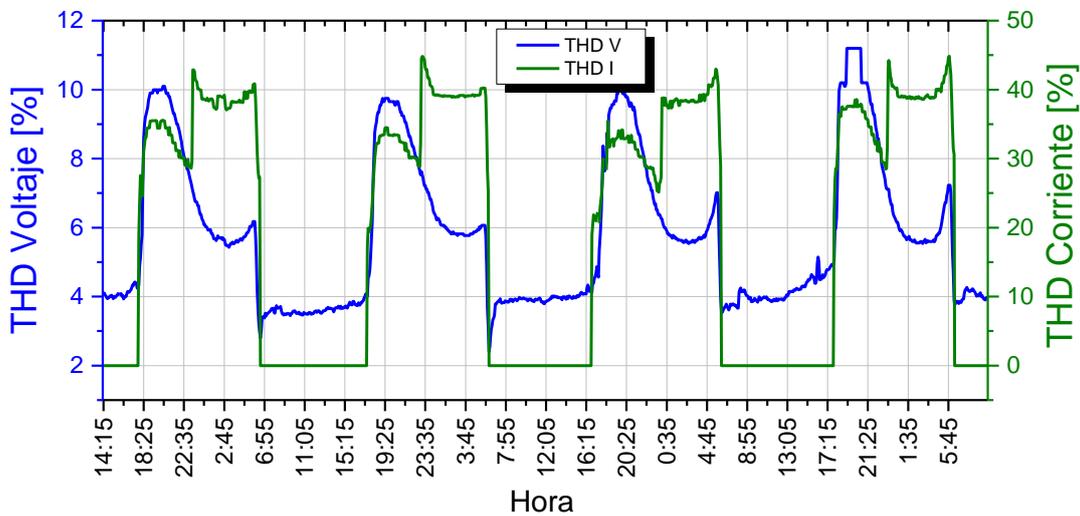
Considerando los resultados obtenidos en este estudio, el contenido armónico de la red de bajo voltaje del transformador No. 35522 podría ser modelado aplicando la misma metodología usada para el transformador No. 41435.

El siguiente transformador es el No.169643 de 25 kVA ubicado en la ruta Collas, se conecta al alimentador G de la subestación Pomasqui (57G) y alimenta a 32 luminarias SAP de 400 W (2P).



**Figura 3.41** Potencia en el transformador No.169643 [Elaboración propia]

Como se observa en la Figura 3.41 la potencia en este transformador varía de acuerdo a la potencia que consumen las luminarias SAP, se observa claramente el control de doble nivel de potencia que se activa alrededor de las 23:30 reduciendo el consumo de potencia de las luminarias.

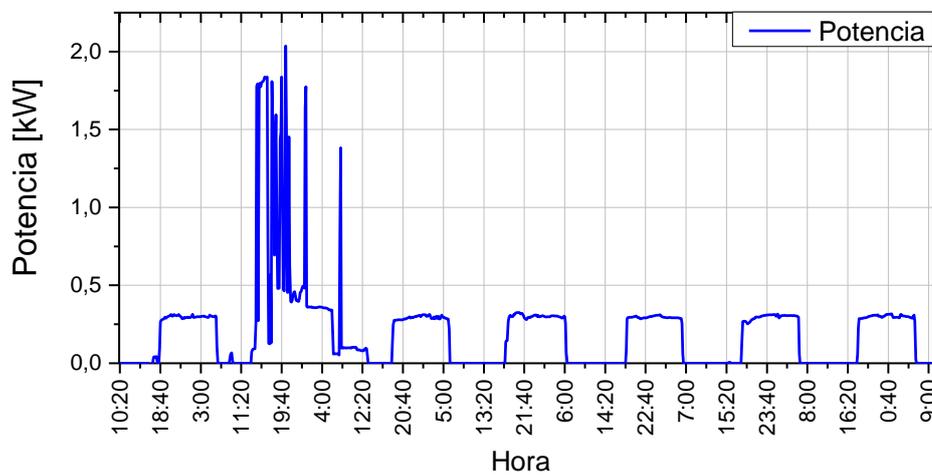


**Figura 3.42** THD V y THD I en el transformador No. 169643 [Elaboración propia]

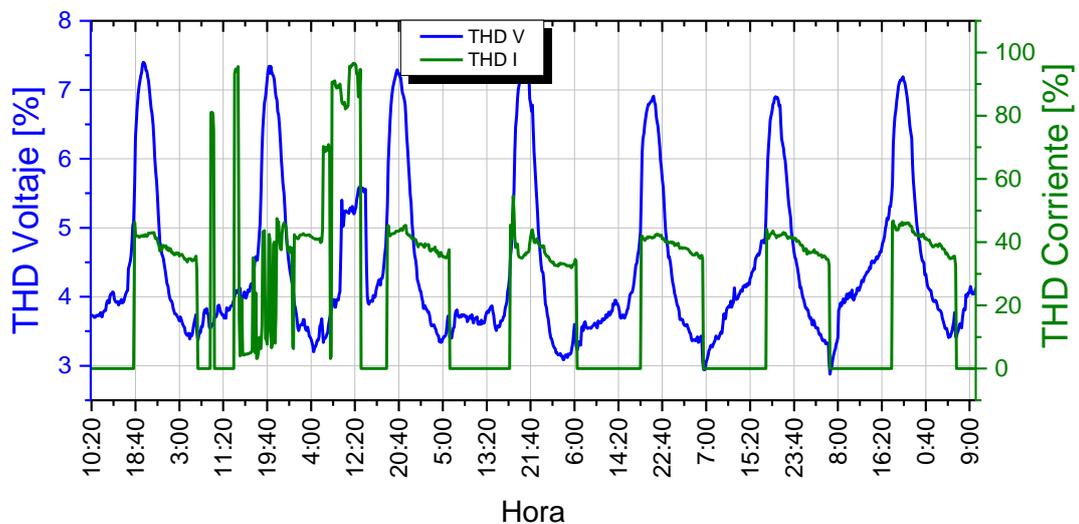
En la Figura 3.42 se aprecia que el contenido armónico de voltaje en el periodo diurno es de alrededor del 4 %, se incrementa en horas de la noche y disminuye en la madrugada aún con las luminarias encendidas al igual que en los dos casos anteriores. Considerando el límite de distorsión armónica total de voltaje del 8 % para bajo voltaje, algunos de los valores medidos estarían fuera del límite.

En este caso la distorsión armónica de corriente que se alcanza es bastante alta en promedio del 37,5 %, por lo que no es posible utilizar la metodología planteada en este trabajo. Se debe considerar el efecto que las características de la red tienen en las luminarias SAP. La corriente armónica que las luminarias SAP producen ya no es la misma que en condiciones de baja distorsión armónica de voltaje. Se cometería un error al modelar las luminarias SAP como fuentes de corriente fijas con el mismo contenido armónico de la luminaria bajo condiciones de distorsión armónica de voltaje casi nula.

Por último, se analiza el transformador No. 44034 de 5 kVA ubicado en la comunidad Yunguilla, el cual se conecta al alimentador C de la subestación Cotocollao (19C) y alimenta a 5 luminarias SAP de 100 W y 3 clientes residenciales.



**Figura 3.43** Potencia en el transformador No. 44034 [Elaboración propia]



**Figura 3.44** THD V y THD I en el transformador No. 44034 [Elaboración propia]

De acuerdo a la Figura 3.44 la distorsión armónica de voltaje que se observa en el período diurno es mayor al 3 %, alcanza altos valores por la noche y disminuye en la madrugada, la distorsión armónica de corriente producida por las luminarias SAP también es alta, alrededor del 39 %.

Analizando los resultados de medición de cada transformador, una vez más se concluye la importancia que tienen las características de la red en el impacto que las cargas no lineales tienen en la distorsión armónica de voltaje.

Una luminaria SAP de 150 W con balasto electromagnético conectada a la red del laboratorio de máquinas de la Escuela Politécnica Nacional, con una distorsión armónica de voltaje del 2,7 % generó una distorsión armónica de corriente del 45,3 % (ver ANEXO G). Esto demostraría que luminarias SAP conectadas en redes con diferentes impedancias y diferentes valores de distorsión armónica de voltaje, producirían distintos valores de THD de corriente.

Luminarias SAP conectadas en paralelo, con gran consumo de corriente y en una red con resonancia serie o paralelo, podrían provocar una distorsión de voltaje y corriente significativa. Recordando que los armónicos de corriente en las luminarias SAP se producen por la no linealidad del arco producido en las lámparas, se debería considerar en estos casos modelar la luminaria SAP como un equivalente Thevenin usando una fuente de voltaje distorsionada en serie con la impedancia del balasto y la red.

### **3.4. ANÁLISIS FINANCIERO**

Para el análisis financiero se realiza un flujo de fondos neto comparando dos alternativas, la primera, reemplazar todas las luminarias SAP de la vía Bulevar por luminarias LED y la segunda, mantener las luminarias SAP en la red de alumbrado público.

#### **3.4.1 TIEMPO DE VIDA**

De acuerdo a las especificaciones técnicas para luminarias del catálogo de las unidades de propiedad del MERNNR [51], la vida útil mínima de las luminarias LED es de 80 000 horas, mientras que la vida media de las lámparas SAP para alumbrado debe ser mayor o igual a 32 000 horas. La vida media es el promedio de tiempo transcurrido de funcionamiento de un lote de fuentes luminosas antes de que haya dejado de funcionar la mitad de dicho lote.

**Tabla 3.29** Duración de vida de una lámpara SAP 400 W OSRAM [52]

Duración	Número de horas
B50	36 000 h
B10	24 000 h
B5	20 000 h

La duración o vida útil de una lámpara SAP OSRAM de 400 W [52] de acuerdo al índice B se muestra en la Tabla 3.29, siendo B10 el tiempo de vida en el que el 10 % de las luminarias requerirá una reparación o cambio, B5 del 5 % y B50 del 50 %.

Considerando las especificaciones técnicas del MERNNR y los datos de catálogo de la lámpara SAP OSRAM de 400 W se decide tomar el valor de 32 000 horas como vida media para las lámparas, equivalente a 7 años teniendo en cuenta que las luminarias deben operar hasta 12 horas al día.

El tiempo de vida de las luminarias LED considerando la vida útil mínima del MERNNR de 80 000 horas, alcanza los 18 años.

### 3.4.2 COSTOS

En el análisis de costos se debe diferenciar entre costos de inversión y operación. Dentro de los costos de inversión se encuentran los activos fijos como son el costo de las luminarias y equipos auxiliares. Las siguientes tablas muestran los costos de instalación para cada tipo de tecnología y los costos de reemplazo de lámparas en el caso de las luminarias SAP. Los costos fueron estimados usando información del sistema de compras públicas del gobierno nacional [53].

**Tabla 3.30** Costos de instalación de luminarias LED con base para fotocontrol

Descripción	P.U (USD)	Cantidad	Precio Total (USD)
Luminarias LED 150 W con base para fotocontrol	476,11	89	42 373,79
Fotocélula	4,14	89	368,46
Mano de obra para la instalación	100	89	8 900
			<b>51 642,25</b>

**Tabla 3.31** Costos de instalación de luminarias LED telecontroladas

Descripción	P.U (USD)	Cantidad	Precio Total (USD)
Luminarias LED 150 W telecontroladas	650,67	89	57 909,63
Mano de obra para la instalación	100	89	8 900
			<b>66 809,63</b>

**Tabla 3.32** Costos de instalación de luminarias SAP

Descripción	P.U (USD)	Cantidad	Precio Total (USD)
Luminarias SAP 400 W	244	89	21 716
Lámparas SAP 400 W	10,11	89	899,79
Fotocélula	4,14	89	368,46
Mano de obra para la instalación	100	89	8 900
			<b>31 884,25</b>

**Tabla 3.33** Costos de reemplazo lámparas SAP

Descripción	P.U (USD)	Cantidad	Precio Total (USD)
Lámparas SAP 400 W	10,11	89	899,79
Mano de obra para reemplazo de lámparas	83,5	89	7 431,5
			<b>8 331,29</b>

Los costos de operación son los costos de producción como el costo de la energía eléctrica. El costo del servicio de alumbrado público general (*CSAPG*) se calcula en base a [54]:

$$CSAPG = CE + CA + CC + CEP \quad (3.6)$$

Donde:

*CE*: Costo de compra de energía

*CA*: Costo de la administración, operación y mantenimiento

*CC*: Costo de calidad

*CEP*: Costo de expansión

El costo de la energía (*CE*) se determina en base al *Análisis de Costos para el Servicio de Alumbrado Público General - Año 2020* [55], elaborado por el ARCONEL para todas las empresas distribuidoras del país, obteniéndose un valor de 3,6 ¢\$/kWh en el caso de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ).

Dentro de los costos de operación se considera también el costo de mantenimiento que se debe realizar en las luminarias cada cierto periodo y el costo de la mano de obra.

El plan de mantenimiento para las luminarias SAP debe incluir el reemplazo de las lámparas SAP cada siete años, por lo que se deben tomar en cuenta los costos de reemplazo de sus lámparas que se detallan en la Tabla 3.33.

### 3.4.3 AHORROS

El ahorro energético se produce por la reducción del consumo de energía al realizar el reemplazo de las luminarias SAP de 400 W por luminarias LED de 150 W. La diferencia de potencia entre las dos luminarias es de 250 W. El ahorro total anual se calcula en base a la Ecuación 3.7, considerando un factor de pérdidas en los balastos del 8 %:

$$\text{Ahorro energía}_{\text{anual}} = P \times HF \times D \times CE \times N \times 1,08 \quad (3.7)$$

Donde:

*P*: Potencia ahorrada

*HF*: Horas de funcionamiento

*D*: Días de funcionamiento

*N*: Número de luminarias

$$\text{Ahorro energía}_{\text{anual}} = 0,25 \text{ kW} \times 12 \text{ h} \times 365 \text{ d} \times 0,036 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} \times 89 \times 1,08 = 3\,789,05 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$$

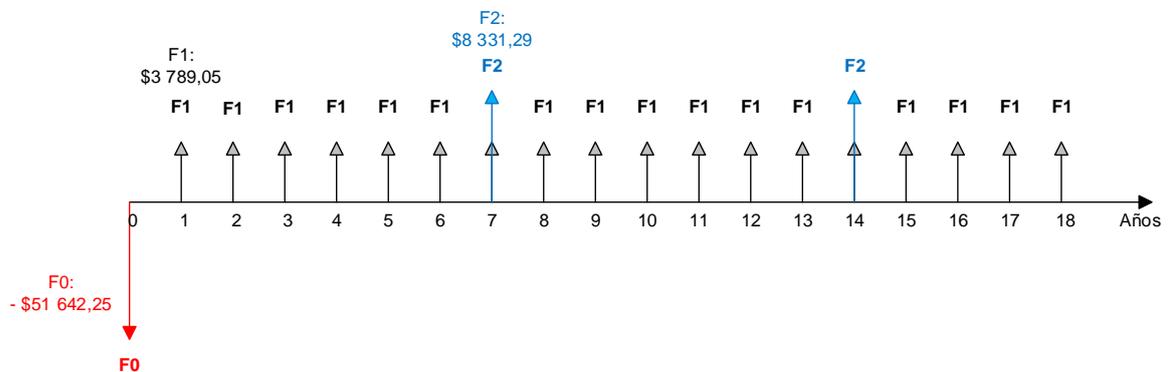
**Tabla 3.34** Ahorro anual por costos de energía

Costo de la energía para A/P (¢\$/kWh)	Ahorro de Potencia (kW)	Número de luminarias (N)	Ahorro total (\$/año)
3,6	0,25	89	3 789,05

El ahorro por mantenimiento se debe a que a diferencia de las luminarias LED, las luminarias SAP requieren un reemplazo periódico de sus lámparas, en este caso cada siete años. El ahorro por el reemplazo de las lámparas SAP es de \$ 8 331,29 como se detalla en la Tabla 3.33.

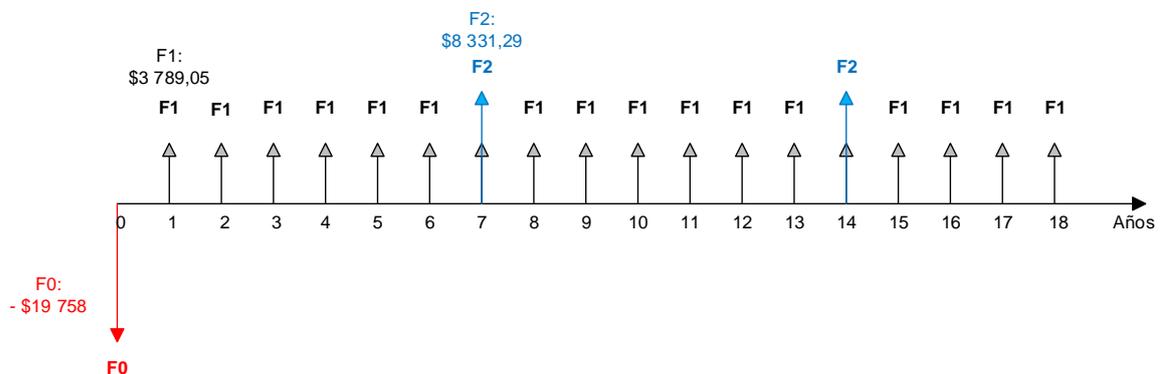
### 3.4.4 FLUJO DE FONDOS

El primer flujo de fondos tiene como flujo negativo (F0) a la inversión inicial que se requiere para la instalación de las luminarias LED, como flujos positivos se consideran el ahorro anual por costos de energía (F1) y el ahorro cada siete años correspondiente al reemplazo de las lámparas SAP (F2).



**Figura 3.45** Flujo de fondos 1 [Elaboración propia]

El segundo flujo de fondos tiene como flujo negativo inicial (F0) a la diferencia entre la inversión que se requiere para la instalación de las luminarias LED y la inversión que se requiere en la instalación de luminarias SAP, como flujos positivos se consideran el ahorro anual por costos de energía (F1) y el ahorro cada siete años correspondiente al reemplazo de las lámparas SAP (F2).



**Figura 3.46** Flujo de fondos 2 [Elaboración propia]

Cada flujo de fondos es realizado considerando la instalación de luminarias LED de 150 W con base para fotocontrol. Los flujos de fondos netos se muestran en el ANEXO H.

### 3.4.5 INDICADORES

Para el cálculo del indicador *VAN* al tratarse de un servicio, se considera una tasa de descuento del 8 %. Adicionalmente se calcula el indicador *TIR* de acuerdo a lo descrito en la fase metodológica. En base a estos dos indicadores se evalúa la rentabilidad del proyecto.

La Tabla 3.35 muestra los valores de los indicadores calculados con cada flujo de fondos.

**Tabla 3.35** Indicadores calculados

	Flujo de fondos 1	Flujo de fondos 2
<b>VAN</b>	<b>-\$ 8 433,99</b>	<b>\$ 23 450,26</b>
<b>TIR</b>	6 %	22 %
<b>d</b>	8 %	8 %

Para el flujo de fondos 1 considerando la vida útil mínima de las luminarias LED de 18 años se obtiene un  $VAN < 0$  y un  $TIR < d$ , por lo que se concluiría que el proyecto no es viable desde el punto de vista financiero. Sin embargo, la mayoría de luminarias LED destinadas para alumbrado público tienen una vida útil mayor a 80 000 horas, algunas pueden alcanzar más de las 100 000 horas.

Para el flujo de fondos 2, de igual tiempo de vida que el flujo de fondos 1, se obtiene un  $VAN > 0$  y un  $TIR > d$ , con lo que se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista financiero. Este flujo de fondos permite comparar de forma más equitativa las dos tecnologías tanto LED y SAP, pues considera la inversión en el tiempo presente que se debe realizar tanto para la instalación de las luminarias LED como para la instalación de las luminarias SAP y toma como inversión inicial la diferencia entre los dos costos.

Si bien el análisis financiero indica que reemplazar las luminarias SAP por luminarias LED resulta más costoso que mantener la tecnología SAP, realizar la sustitución de las luminarias genera beneficios adicionales para la red de distribución, entre ellos los siguientes:

- El contenido armónico de la red de distribución mejora, ya que como se vio en la sección anterior, al realizar el reemplazo de las luminarias SAP por luminarias LED se reduce la distorsión armónica de corriente considerablemente (5 veces menor),

por lo que, el reemplazo traería beneficios para la calidad de energía de la red considerando que los valores de TDD simulados con las luminarias SAP superaban los límites establecidos en la regulación. Al emplear luminarias LED los valores de TDD simulados, así como las componentes armónicas individuales cumplen con todos los límites de la regulación 005/18.

- Aunque la inversión para la instalación de luminarias LED es alta, se producen beneficios económicos pues se ahorra en consumo de energía y en costos de mantenimiento debido a la sustitución de lámparas SAP.
- La eficacia de las luminarias LED es alta, por lo que se reduce el consumo energético y por ende la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite al ambiente debido a la producción de electricidad. Así el reemplazo de las luminarias contribuye a la disminución de los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y sus posibles impactos ambientales.
- La tecnología LED a diferencia de las lámparas de descarga de alta presión no emplea mercurio u otro tipo de metal pesado, los cuales son contaminantes al ser arrojados al medio ambiente una vez culminada la vida útil de la lámpara.
- Las luminarias LED con luz blanca (> 2 500 K, CRI > 60 %) brindan mayor seguridad ciudadana ya que permiten distinguir mejor los objetos y existe un mayor reconocimiento facial [56], la luz blanca además ofrece mejores rendimientos para la visión del ojo humano.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES**

El reemplazo de luminarias SAP por luminarias de tecnología LED genera un impacto positivo en la red. Al usar luminarias LED de alto factor de potencia y bajo contenido armónico de corriente, se logra reducir la distorsión armónica de corriente que se inyecta a la red de distribución, así como reducir el consumo de potencia, todo esto cumpliendo con los requisitos de iluminación de las vías.

El modelo de simulación empleado demuestra que el grado de impacto que las luminarias SAP y LED pueden tener en la distorsión armónica de voltaje, dependerá de las características de la red de distribución, principalmente de la impedancia del sistema y su respuesta en función de la frecuencia. Es por esto que en nodos ubicados en diferentes partes de la red con el mismo tipo de carga no lineal se observan diferentes valores de distorsión armónica de voltaje.

Una distorsión armónica de corriente alta, pero con bajos valores de corriente, como en el caso de piezas individuales probadas en el laboratorio, no genera una distorsión de voltaje alta.

La mayor parte del contenido armónico de voltaje que se observa en el secundario de transformadores que alimentan a luminarias SAP proviene de fuentes externas a las luminarias, si bien las luminarias aportan al THDV, el mayor porcentaje se genera en la red externa.

Las luminarias SAP en condiciones de voltaje distorsionado alcanzan valores de distorsión de corriente altos comparados con las luminarias LED y podrían causar una distorsión de voltaje alta dependiendo de la impedancia de la red, provocando problemas a cargas sensibles conectadas al PCC. Las luminarias LED por su parte al contar con un driver, aseguran un contenido armónico de corriente casi fijo siempre y cuando el voltaje de entrada tenga un THDV máximo del 10 %.

Con la instalación de las luminarias LED en alumbrado público se consigue un ahorro en energía y en costos de mantenimiento, además se reducen los niveles de contaminación al medio ambiente y se genera mayor seguridad ciudadana.

El reemplazo de las luminarias SAP de 400 W de la vía Bulevar por luminarias LED de 150 W genera un ahorro anual por consumo de energía de 3 789,05 USD, una reducción en la distorsión armónica de corriente que se inyecta en la red del 17 % y un ahorro neto de potencia de 240 W por luminaria.

## **4.2. RECOMENDACIONES**

Para modelar las fuentes de corriente armónica en redes de distribución con un alto contenido de distorsión armónica de voltaje se recomienda emplear un equivalente Thevenin como modelo de las luminarias SAP, que por medio de una fuente armónica de voltaje distorsionada y una impedancia refleje la interacción de la distorsión armónica de voltaje con la distorsión armónica de corriente que producen estas luminarias.

Modelar las fuentes armónicas de corriente y voltaje en función de su variación en el tiempo de acuerdo al comportamiento de la red de distribución, de tal forma que se considere el perfil de carga en cada transformador y las variaciones de la demanda.

Medir la distorsión armónica tanto del lado de bajo como de medio voltaje de los transformadores de distribución para facilitar la modelación de la fuente de distorsión armónica de fondo.

Aplicar la metodología a nuevos casos de estudio que consideren la inserción de diferentes tipos de cargas no lineales.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. K. Yam and Z. Hassan, "Innovative advances in LED technology," in *Microelectronics Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 129–137, 2005.
- [2] A. Burton, H. Le Minh, N. Aslam, L. Le, and T. D. Nguyen, "LED based lighting and communications: An emerging technology for a greener more sustainable future," in *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 4, no. 13, pp. 1-6, 2017.
- [3] B. T. Jeremias, E. M. Yoxkin, J. R. T. Juan, and R. G. Francisco, "Photovoltaic Energy, LED Technology and Energy Efficiency in the ITSAO," *2018 XXXI INTERNATIONAL SUMMER MEETING ON POWER AND INDUSTRIAL APPLICATIONS (RVP-AI)*, Acapulco, 2018, pp. 19-22.
- [4] B. R. Sharma, "Solid State Lightening Component LED: Role in Modern Lightening Technology," in *The Himalayan Physics*, vol. 6, pp. 115–118, Apr. 2017.
- [5] K. Herbert, E. Efficiency, and P. Manager, "Texas Street Lighting Assessment," January, 2015.
- [6] EEQ, "La EEQ instala iluminación LED en el Centro Histórico," 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.eeq.com.ec:8080/-/la-eeq-instala-iluminacion-led-en-el-centro-historico>. [Accedido: 31-Mar-2019].
- [7] Municipio de Rumiñahui, "Municipio inauguró iluminación de plaza cívica," 2016. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/36BevAV>. [Accedido en: 31-Mar-2019].
- [8] Alcaldía de Guayaquil, "Municipio de Guayaquil inaugura sistema de luces LEDs en la Av. 9 de octubre de malecón Simón Bolívar a puente 5 de Junio," 2017. [En línea]. Disponible en: <https://guayaquil.gob.ec/noticias-actuales/2342>. [Accedido: 31-Mar-2019].
- [9] D. Andrade, M. Balseca, y A. Flores, "Ficha Informativa de Proyecto 2018 Gerencia de Proyectos Especiales Dirección de Control y Seguimiento," 2018.
- [10] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, and M. A. Hannan, "An analysis of harmonics from LED lamps," *2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 2012, pp. 837-840.
- [11] S. Uddin, H. Shareef, and A. Mohamed, "Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps," in *Measurement*, vol. 46, no. 10, pp. 3783–3795, 2013.

- [12] P. Acuña, "Impacto del Alumbrado Público con LEDs en la Red de Distribución," M.Sc. Tesis, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2011.
- [13] *Prestación del Servicio de Alumbrado Público General*, REGULACIÓN Nro. ARCONEL 006/18, 2018.
- [14] I. H. Hahn, "Luminosity Curve," 2010. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LuminosityCurve1.svg#file>. [Accessed: 05-Nov-2019].
- [15] Schröder Gropu GIE, "Seminario de Alumbrado Vial," no publicado.
- [16] J.F. Waymouth, "The Role of Science in Light-Source Development and Optimization", in *History of Light Sources*, Switzerland: Springer International, 2017, pp. 5-7.
- [17] History Channel, "¿Quién inventó la bombilla?," 2018. [En línea]. Disponible en: <https://canalhistoria.es/blog/quien-invento-la-bombilla/>. [Accedido: 01-Jun-2019]
- [18] F. Horst, "Electromagnetic Spectrum," 2006. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum\\_-de.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_-de.svg). [Accessed: 01-Jun-2019].
- [19] A. A. Usón, I. Z. Bribián, S. D. de Garaio, y E. L. Sastresa, "Eficiencia en las instalaciones," en *Eficiencia energética en instalaciones y equipamiento de edificios*, 1st ed. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010, pp. 153-170.
- [20] Grupo de Estudios Luminotécnicos-UPC, "Fuentes de luz y equipos auxiliares." [En línea]. Disponible en: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-equiposAuxiliares.php>. [Accedido: 01-Jun-2019].
- [21] W. H. Alarcón, "Niveles Lumínicos del alumbrado público en el Ecuador," Escuela de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2002.
- [22] I. O. Mockey y E. R. Manzano. Tendencias en la consideración de la depreciación luminosa de las lámparas empleadas en alumbrado viario. *Energética* [En línea]. 34 (1), 21–32. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012013000100003&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012013000100003&lng=es&nrm=iso).

- [23] T. Sánchez, "Niveles y Bandas de Energía," en *Electrónica: Dispositivos y Aplicaciones*, 2da ed. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2013, pp. 15-24.
- [24] H. Swami, A. K. Jain, I. H. Azad, and N. Meena, "Evaluation of input harmonic characteristics of LED lamps connected to utility grid," *2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT)*, New Delhi, 2018, pp. 1–6.
- [25] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, "Fundamentals in harmonics," in *Electrical Power Systems Quality*, 2nd Ed. Nueva York: McGraw-Hill, 2003, pp. 167-293.
- [26] *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas*, UNE-EN 61000-4-7:2002, 2004
- [27] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Std 519-2014, 2014
- [28] R. Dwyer *et al.*, "Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights On Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 1772-1779, Nov. 1995.
- [29] I. Castro, A. Vazquez, M. Arias, D. G. Lamar, M. M. Hernando and J. Sebastian, "A Review on Flicker-Free AC–DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 10035-10057, Oct. 2019.
- [30] *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada  $\leq 16A$  por fase)*, UNE-EN 61000-3-2:2006, 2006.
- [31] G. A. Henao Peñaranda y J. A. Castro Wilches, "Diseño e implementación de un driver para bombillas domiciliarias LED con corrección de factor de potencia y disminución de THD," Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2016.
- [32] B. A. Loza y E. J. Pacheco, "Diseño y construcción de un convertidor de potencia para luminarias tipo LED," Escuela de ingeniería electrónica y telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2017.

- [33] J. R. Ruiz Cajas, "Estudio de armónicos generados por convertidores estáticos," Facultad de ingeniería eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1995.
- [34] *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro*, IEC 61000-4-30, 2009.
- [35] *Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*, REGULACIÓN Nro. ARCONEL 005/18, 2018.
- [36] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury and M. J. Samotyi, "An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads," *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, Chicago, IL, USA, 1994, pp. 110-116.
- [37] W. M. Grady, A. Mansoor, E. F. Fuchs, P. Verde and M. Doyle, "Estimating the net harmonic currents produced by selected distributed single-phase loads: computers, televisions, and incandescent light dimmers," *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, New York, NY, USA, 2002, pp. 1090-1094 vol.2.
- [38] K. Genovez y B. Torres, "Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución," Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2018.
- [39] N. R. Noroña Lucero, "Diagnóstico de perturbaciones armónicas en el sistema nacional interconectado," Facultad de ingeniería eléctrica y electrónica, Escuela politécnica nacional, Quito, Ecuador, 2011.
- [40] METREL, "MI 2892 Manual de instrucciones." pp. 163–168, 2014.
- [41] SONEL SA, "USER MANUAL POWER QUALITY ANALYZERS PQM-702 PQM-710." pp. 115–126, 2017.
- [42] G. Salazar, "Apuntes materia Calidad de Energía." 2017.
- [43] CYME, "Análisis armónico," 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.cyme.com/es/software/cymecymharmo/>. [Accedido: 07-Dic-2019].
- [44] T. Sánchez, "Formulación de proyectos", no publicado.
- [45] P. Carrasco, "Tercera Unidad," en *Evaluación financiera de proyectos*, 1ra ed. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2013, pp. 62-77.
- [46] Google Maps, "Vía Bulevar Sangolquí," 2015. [En línea]. Disponible en:

- <https://bit.ly/2LWnPHW>. [Accedido: 07-Oct-2019].
- [47] MERNNR, “Especificaciones Técnicas de luminarias LED,” 3, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2EgHFt4>. [Accedido: 12-Nov-2019].
- [48] P. Ixtaina, B. Bannert, y A. Gallardo, “Efectos de la iluminación led en el coeficiente de luminancia,” *XIII Congreso Panamericano de Iluminación LUXAMÉRICA 2016*, La Serena, Chile, 2016, pp. 1–7.
- [49] Laboratorio de Luminotecnia, “Apuntes Laboratorio de Luminotecnia.” 2019.
- [50] MERNNR, “Códigos UP-Conductores,” 2, 2016. [En línea]. Disponible en: [http://www.unidadesdepropiedad.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=495&Itemid=565](http://www.unidadesdepropiedad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=495&Itemid=565). [Accedido: 01-Nov-2019]
- [51] MERNNR, “Especificaciones técnicas luminarias con lámpara de vapor de sodio de alta presión.” 2019.
- [52] OSRAM, “NAV-T 400 W SUPER 4Y,” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/36LyWM8>. [Accedido: 05-Dic-2019]
- [53] Compras Públicas, “Sistema de compras públicas.” [En línea]. Disponible en: <https://www.compraspublicas.gob.ec>. [Accedido: 05-Dic-2019].
- [54] ARCONEL, “Pliegos Tarifarios de los servicios públicos de energía eléctrica y de alumbrado público general-Año 2018.” pp. 30–36, 2018.
- [55] ARCONEL, “Análisis de costos empresas distribuidoras.” Quito, p. 1, 2020.
- [56] M. S. Benjumea, “Propuesta para la implementación del sistema ‘LED’ para la iluminación pública de antioquia,” Escuela de Ingeniería de Antioquia, Antioquia, Colombia, 2009.

# **ANEXOS**

ANEXO A. Resultados de simulación en DIALux con luminarias LED 150 W

ANEXO B. Resultados fotométricos luminaria LED 150 W empleada en los ensayos de laboratorio

ANEXO C. Cumplimiento de los requerimientos de las condiciones de ensayo

ANEXO D. Temperatura de ensayo

ANEXO E. Desviación estándar por orden armónico de las medidas en el laboratorio

ANEXO F. Mediciones en luminarias LED 60 W y 120 W

ANEXO G. Medición luminaria SAP 150 W

ANEXO H. Flujo de fondos neto

## ORDEN DE EMPASTADO



### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R."

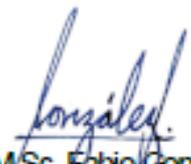
### FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA DECANATO

#### ORDEN DE EMPASTADO

De conformidad al Artículo 101 del REGLAMENTO DE RÉGIMEN ACADÉMICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL aprobado por Consejo Politécnico en Octubre de 2017 y al INSTRUCTIVO PARA EL PROCEDIMIENTO DE TRABAJOS DE TITULACIÓN DE LAS CARRERAS DE PRE-GRADO Y PROGRAMAS DE POSGRADO DE LA FIEE, aprobado por Consejo de Facultad el 24 de enero de 2019 que establece que *"El Decano de la FIEE, remitirá los informes de calificación al Director del Trabajo de Titulación y le solicitará un informe de conformidad en relación a las observaciones planteadas, este informe será presentado al Decano en un plazo no mayor a diez días, quien a su vez emitirá la autorización de impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación o Tesis de Grado."*, una vez verificado el cumplimiento del formato de presentación establecido, autorizo la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por la señorita:

**MAYTE CAROLINA BRUSIL GUAMAN**

Fecha de autorización: 15 de abril de 2020

  
M.Sc. Fabio González  
Decano

Fada P.