



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD ELÉCTRICA  
DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN EN ALUMBRADO  
PÚBLICO**

Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico

**Autores:**

Naranjo Chávez Juan Carlos

Osorio Grefa Justin Emanuel

**Tutor Académico:**

Ing. Gabriel Pesántez MSc.

**LATACUNGA-ECUADOR**

**2024-2025**

**LATACUNGA– ECUADOR**

**FEBRERO-2025**

**DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Naranjo Chávez Juan Carlos, con cédula de ciudadanía No. 050432393-2 , Osorio Grefa Justin Emanuel , con cédula de ciudadanía No. 150089769-7 declaramos ser autores del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD ELÉCTRICA DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN EN ALUMBRADO PÚBLICO”** siendo el Ing. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios MSc. Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, febrero 17 de 2025

Juan Carlos Naranjo Chávez

Justin Emanuel Osorio Grefa

C.C: 050432393-2

C.C: 15008976-7

## **AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD ELÉCTRICA DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN EN ALUMBRADO PÚBLICO”**, de Naranjo Chávez Juan Carlos; Osorio Grefa Justin Emanuel, de la carrera Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 17 de febrero de 2025

Ing. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios Msc.

C.C.: 0301893889

TUTOR

## **AVAL DE APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE TITULACIÓN**

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Naranjo Chávez Juan Carlos; Osorio Grefa Justin Emanuel, con el título del Proyecto de Investigación: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD ELÉCTRICA DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN EN ALUMBRADO PÚBLICO”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 24 de febrero de 2025

Para constancia firman:

Ing. Wilian Patricio Guamán  
Cuenca Msc.

CC: 0603578956

**LECTOR 1 (PRESIDENTE)**

Ing. Marco Aníbal León Segovia  
Msc.

CC: 0502305402

**LECTOR 2 (MIEMBRO)**

Ing. Manuel Ángel León Segovia  
Msc.

CC: 0502041353

**LECTOR 3 (MIEMBRO)**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

### TÍTULO: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD ELÉCTRICA DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN EN ALUMBRADO PÚBLICO”

#### **Autores:**

Naranjo Chávez Juan Carlos

Osorio Grefa Justin Emanuel

#### **RESUMEN**

El presente informe de investigación tiene como objetivo evaluar la influencia de armónicos generados por diferentes tecnologías de iluminación en alumbrado público mediante mediciones y simulaciones, con el fin de analizar su comportamiento a la red eléctrica. Para ello, se establece una metodología en la que se analizaron luminarias de diversas tecnologías y potencia, facilitadas por la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. (ELEPCOSA), se realiza 16 pruebas con la utilización del analizador de calidad de energía eléctrica Fluke 435 series II en 7 luminarias para determinar los índices de calidad de energía. Para ello se realizó la medición durante 3 horas continuas con intervalos de 3 segundos; la primera medición se realiza en una instalación residencial durante un día hábil con alta demanda energética; la segunda medición se efectuó un fin de semana que es usando la demanda disminuye; la tercera medición se realiza en la Universidad Técnica de Cotopaxi utilizando una conexión trifásica en grupos según la tecnología. Los datos obtenidos son procesados con el fin de analizar la distorsión armónica total (THD) e individual en cada luminaria, de tal manera se logra conseguir información sobre los armónicos representados de cada tipo de luminaria. Posteriormente, se simula considerando dos casos y tres escenarios. En el primer caso se estudia cómo afectan los armónicos en un transformador trifásico y un transformador monofásico. Para el segundo caso, analizamos tres escenarios; el primero se evalúa el estado actual del sistema; el segundo se presenta la transición parcial hacia una nueva tecnología de iluminación y en el tercer escenario se contempla el reemplazo de la tecnología de iluminación. Para determinar los límites de armónicos se basa en la regulación ARCERNR 003/2023. Siendo así que se visualiza mejoras en la red en el tercer escenario, también se evaluara la viabilidad de la transición de tecnologías de iluminación en el alumbrado público.

**Palabras clave:** tecnologías de iluminación, armónicos, consumo, simulación, calidad, alumbrado público.

# TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

## FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

### TITLE: “COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRICAL QUALITY INDICES OF DIFFERENT LIGHTING TECHNOLOGIES IN PUBLIC LIGHTING”

**Authors:**

Naranjo Chávez Juan Carlos

Osorio Grefa Justin Emanuel

### ABSTRACT

The purpose of this research report is to evaluate the influence of harmonics generated by different lighting technologies in public lighting through measurements and simulations, in order to analyze their behavior in the electrical network. To achieve this, a methodology is established in which luminaires of various technologies and power levels, provided by the Provincial Electric Company Cotopaxi S.A. (ELEPCOSA), are analyzed. A total of 16 tests were performed using the Fluke 435 Series II power quality analyzer on seven luminaires to determine energy quality indices. For this purpose, measurements were conducted for three continuous hours at 3-second intervals. The first measurement was taken in a residential installation during a business day with high energy demand. The second measurement was performed over a weekend when demand decreases. The third measurement was conducted at the Technical University of Cotopaxi using a three-phase connection, grouping the luminaires according to their technology. The data obtained were processed to analyze both the total harmonic distortion (THD) and individual harmonic distortion for each luminaire, allowing us to gather information on the harmonics produced by each type of luminaire. Subsequently, simulations were carried out considering two cases and three scenarios. In the first case, the effects of harmonics on a three-phase transformer and a single-phase transformer were analyzed. In the second case, three scenarios were evaluated: (1) the current state of the system, (2) a partial transition to a new lighting technology, and (3) the complete replacement of the lighting technology. To determine harmonic limits, the study follows the ARCERNR 003/2023 regulation. Given that improvements in the network are observed in the third scenario, the feasibility of transitioning to new lighting technologies in public lighting will also be evaluated.

**Keywords:** lighting technologies, harmonics, consumption, simulation, quality, public lighting.

**AGRADECIMIENTO**

*A la Universidad Técnica de Cotopaxi, personal que conforma la institución por brindarme la oportunidad de crecer académicamente y profesionalmente.*

*A mis familiares, por su amor incondicional y respaldo en cada etapa de este camino; a mis amigos, por su compañía y aliento constante; y a mis compañeros, por compartir juntos este proceso de aprendizaje y crecimiento. A todos, mi más sincero reconocimiento y gratitud.*

*Juan N.*

**AGRADECIMIENTO**

*Agradezco profundamente a Dios por brindarme fortaleza y sabiduría en este camino académico. A mis padres y familia, por su apoyo incondicional y confianza en mí. A mis amigos y compañeros, por su compañía y motivación constante. Finalmente, a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la culminación de esta etapa.*

*Justin O.*

**DEDICATORIA**

*A mi familia, pilar fundamental en cada paso de mi camino.*

*A mi madre, por su esfuerzo incansable, sacrificio y su amor infinito, que me han guiado motivado en cada desafío, mis abuelos cuya dedicación y lucha a lo largo de los años han sido ejemplo de fortaleza y perseverancia.*

*Juan N.*

**DEDICATORIA**

*Dedico esta tesis a mi familia, cuyo apoyo incondicional y aliento han sido mi mayor fortaleza en este camino académico. A mis docentes y mentores, por su guía y enseñanzas que han enriquecido mi formación. A mis amigos, por su compañía y motivación en los momentos desafiantes. A todas aquellas personas que, de alguna manera, contribuyeron con su conocimiento y experiencia a la realización de este trabajo. Con gratitud y respeto, ofrezco este esfuerzo como reflejo de dedicación y perseverancia, de igual forma a mi prometida quien siempre estuvo en las buenas en las malas, en todo momento apoyándome para ser una gran persona y de igual forma un buen ingeniero.*

*Justin O.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	iii
AVAL DE APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
<i>AGRADECIMIENTO</i> .....	vii
<i>DEDICATORIA</i> .....	ix
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1 SITUACIÓN PROBLÉMICA .....	2
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	3
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	3
2.3.1 Objeto de Investigación .....	3
2.3.2 Campo de Acción.....	3
2.4 BENEFICIARIOS .....	3
2.4.1 Directo.....	3
2.4.2 Indirecto .....	3
2.5 JUSTIFICACIÓN .....	3
2.6 HIPÓTESIS.....	4
2.7 OBJETIVOS .....	5
2.7.1 General.....	5
2.7.2 Específicos.....	5
2.8 SISTEMAS DE TAREAS .....	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	7
3.1 CRITERIOS GENERALES DE ILUMINACIÓN.....	7
3.1.1 Parámetros de Iluminación .....	7

3.2	ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN .....	9
3.2.1	Tecnología de descarga.....	9
3.3	NORMATIVA .....	17
3.3.1	Normativa Internacional .....	17
3.3.2	Normativa Nacional .....	17
3.4	MANTENIMIENTO DE LUMINARIAS .....	19
3.4.1	Mantenimiento para sistemas de iluminación exterior .....	19
3.4.2	Curva de la Bañera aplicada a luminarias.....	21
3.4.3	Criterios de alumbrado público .....	21
3.5	CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	22
3.5.1	Perturbaciones .....	22
3.5.2	Impactos de los sistemas de iluminación en la red eléctrica .....	23
3.5.3	Armónicos.....	24
4.	METODOLOGÍA.....	25
4.1	VIDA ÚTIL Y DESGASTE DE LAS LUMINARIAS. ....	26
4.2	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA Y EL IMPACTO DE ARMÓNICOS EN RED .....	27
4.2.1	Medición de armónicos.....	27
4.2.2	Obtención de datos.....	28
4.2.3	Tabulación de Datos.....	28
4.2.4	Simulación de armónicos en la red .....	30
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	34
5.1	ARMÓNICOS PRODUCIDO POR TIPO DE LUMINARIA .....	34
5.1.1	Medición 1- Luminaria 1 de 400 W .....	34
5.1.2	Medición 2 - Luminaria 2 de 250 W .....	36
5.1.3	Medición 3 - Luminaria 3 de 150 W .....	39
5.1.4	Medición 4 - Luminaria 4 de 100 W .....	41

5.1.5	Medición 5 - Luminaria 5 de 90 W .....	44
5.1.6	Medición 6 - Luminaria 6 de 150 W.....	46
5.1.7	Medición 7 - Luminaria 7 de 150 W.....	49
5.2	ANÁLISIS COMPARATIVO DE ARMÓNICOS PARA DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ALUMBRADO.....	52
5.3	CASO DE ESTUDIO 1 – SISTEMA CON UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO .....	54
5.3.1	Escenario 1: Simulación de un sistema con un transformador monofásico y trifásico.....	55
5.4	CASO DE ESTUDIO 2 – ALIMENTADOR .....	56
5.4.1	Escenario 1: Situación actual de las tecnologías del alumbrado público del sistema de San Rafael .....	57
5.4.2	Escenario 2: Proceso de cambio de tecnologías del alumbrado público del sistema de San Rafael .....	58
5.4.3	Escenario 3: Transición completa de las tecnologías del alumbrado público del sistema de San Rafael.....	60
5.4.4	Escenario 4: Aleatoriedad de la introducción de armónicos por cada tecnología de iluminación. ....	61
5.4.5	Comparación de los índices de calidad en del sistema .....	63
5.5	ANÁLISIS ECONÓMICO DE DIFERENTES TECNOLOGÍA DE ILUMINACIÓN 69	
5.5.1	Viabilidad del reemplazo de tecnología sodio por tecnología LED.....	73
6.	CONCLUSIONES.....	74
7.	RECOMENDACIONES .....	76
8.	REFERENCIAS .....	77
9.	ANEXO.....	81

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Componentes de luminaria LED [5].	15
Figura 2. Porcentajes de iluminación inicial [20].	21
Figura 3. Diagrama de flujo.	26
Figura 4. Red original de la subestación San Rafael.	30
Figura 5. Red reducida de la subestación San Rafael.	31
Figura 6. Tecnologías de luminarias en el sistema	32
Figura 7. Sistema desbalanceado.	33
Figura 8. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 400W.	34
Figura 9. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 400W.	34
Figura 10. Armónicos individuales de corriente luminaria de 400W.	36
Figura 11. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 250W.	36
Figura 12. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 250W.	37
Figura 13. Armónicos individuales de corriente luminaria de 250W.	38
Figura 14. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 150W.	39
Figura 15. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 150W.	39
Figura 16. Armónicos individuales de corriente luminaria de 150W.	41
Figura 17. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 100W.	41
Figura 18. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 100W.	42
Figura 19. Armónicos individuales de corriente luminaria de 100W.	43
Figura 20. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 90W.	44
Figura 21. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 90W.	44
Figura 22. Armónicos individuales de corriente luminaria de 90W.	46
Figura 23. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 150W- vía pública.	46
Figura 24. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 150W - vía pública.	47
Figura 25. Armónicos individuales de corriente luminaria de 150W - vía pública.	48
Figura 26. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 150W – espacios recreativos.	49
Figura 27. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 150W – espacios recreativos.	49
Figura 28. Armónicos individuales de corriente luminaria de 150W – espacios recreativos.	51
Figura 29. Armónicos individuales en el transformador trifásico.	55
Figura 30. Armónicos individuales en el transformador monofásico	56
Figura 31. C1_Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117).	57
Figura 32. C1_Distorsión armónica en la entrada del transformador TR_TRT0019(15).	58

Figura 33. C1_Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138). .....	58
Figura 34. C2_Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117). .....	59
Figura 35. C2_Distorsión armónica en la entrada del transformador TR_TRT0019 (15). .....	59
Figura 36. C2_Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138). .....	60
Figura 37. C3_Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117). .....	60
Figura 38. C3_Distorsión armónica en la entrada del transformador TR_TRT0019 (15). .....	61
Figura 39. C3_Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138). .....	61
Figura 40. C4._ Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117). .....	62
Figura 41. C4_Distorsión armónica en la entrada del transformador TR_TRT0019 (15). .....	62
Figura 42. C4_Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138). .....	63

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Ejemplo del Sistema de Tareas del Proyecto de Investigación. ....	6
Tabla 2. Parámetros de iluminación, parte A [10]. ....	7
Tabla 3. Parámetros de iluminación, parte B [10]. ....	8
Tabla 4. Características de luminarias de mercurio de alta presión [10]. ....	10
Tabla 5. Características de luminarias de sodio baja presión [10]. ....	10
Tabla 6. Características de luminarias de sodio de alta presión [10]. ....	11
Tabla 7. Características de luminarias de haluros metálicos [10]. ....	12
Tabla 8. Características de luminarias de halogenuros metálicos [10]. ....	13
Tabla 9. Comparativa de luminarias de inducción [10]. ....	14
Tabla 10. Comparación de tecnologías, parte A [17]. ....	15
Tabla 11. Comparación de tecnologías, parte B [17]. ....	16
Tabla 12. Comparación de luminarias [10]. ....	16
Tabla 13. Causas y recomendaciones de mantenimiento de luminarias exterior [20]. ....	20
Tabla 14. Perturbaciones eléctricas, parte A [25]. ....	22
Tabla 15. Perturbaciones eléctricas, parte B [25]. ....	23
Tabla 16. Comparación de diferentes tecnologías en la red [11], [26]. ....	24
Tabla 17. Vida útil de diferentes tecnologías de iluminación [6]. ....	27
Tabla 18. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [29]. ....	29
Tabla 19. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [29]. ....	29
Tabla 20. Cantidad de luminarias Subestación San Rafael .....	32
Tabla 21. Número de luminarias por capacidad de transformador. ....	32
Tabla 22. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 400W. ....	35
Tabla 23. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 250W, parte A. ....	37
Tabla 24. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 250W, parte B. ....	38
Tabla 25. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W. ....	40
Tabla 26. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 100W, parte A. ....	42
Tabla 27. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 100W, parte B. ....	43
Tabla 28. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 90W. ....	45
Tabla 29. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W, parte A. ....	47
Tabla 30. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W, parte B. ....	48
Tabla 31. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W. ....	50
Tabla 32. Resumen de distorsión armónica total. ....	52

Tabla 33. Disposición de luminarias por potencia. ....	57
Tabla 34. Comparación de Distorsión armónica total, parte A. ....	63
Tabla 35. Comparación de Distorsión armónica total, parte B. ....	64
Tabla 36. Comparación de escenarios con transformadores, parte A. ....	65
Tabla 37. Comparación de escenarios con transformadores, parte B. ....	66
Tabla 38. Muestra de distorsión armónica total de sistema en líneas, parte A. ....	67
Tabla 39. Muestra de distorsión armónica total de sistema en líneas, parte B. ....	68
Tabla 40. Diferencia entre el escenario 1 y escenario 4 de los transformadores. ....	69
Tabla 41. Diferencia entre el escenario 1 y escenario 4 de las líneas. ....	69
Tabla 42. Costo de desmontaje para luminarias de sodio. ....	70
Tabla 43. Costo de montaje para luminarias LED. ....	70
Tabla 44. Costo total de cambio de tecnología. ....	71
Tabla 45. Comparativa sodio y LED. ....	71
Tabla 46. Potencia de pérdidas. ....	72
Tabla 47. Costos totales del alumbrado público. ....	72
Tabla 48. Ahorro total del sistema. ....	73
Tabla 49. Valor actual neto y Tasa interna de retorno. ....	73

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Tema del proyecto:** Análisis Comparativo de los Índices de Calidad Eléctrica de Diferentes Tecnologías de Iluminación en Alumbrado Público.

**Modalidad de Titulación:**

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación                      x

**Carrera:** Ingeniería en electricidad

**Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:** Estrategias de planeación de sistemas eléctricos de distribución en el contexto de la transición eléctrica.

**Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:**

Estudiantes

- Osorio Grefa Justin Emanuel
- Naranjo Chávez Juan Carlos

Tutor

- Gabriel Napoleón Pesantez Palacios

**Área de Conocimiento:** 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

**Línea de investigación:** Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:** Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos con energía convencional y alternativa.

## **2. INTRODUCCIÓN**

El uso eficiente de la energía eléctrica es uno de los principales objetivos en la industria eléctrica. En particular, el empleo de luminarias fluorescentes compactas y de luminarias con diodos emisores de luz (LED) ha contribuido a mejorar la eficiencia energética. Sin embargo, la alta presencia de carga no lineales en la red de distribución ha generado nuevos desafíos para las empresas de servicios públicos [1].

El alumbrado público desempeña un papel fundamental en la seguridad y eficiencia del entorno urbano. La evolución de las tecnologías de iluminación ha permitido la transición de sistemas tradicionales, como las lámparas de descarga de alta intensidad (HID) y fluorescentes, hacia alternativas más eficientes, como los diodos emisores de luz (LED). Sin embargo, este cambio no está exento de desafíos, particularmente en términos de calidad de energía, donde la generación de armónicos puede afectar la estabilidad de la red eléctrica y la vida útil de los equipos conectados [2].

Las luminarias LED han demostrado una alta eficiencia energética y larga vida útil, lo que ha incentivado su adopción en sistemas de alumbrado público a nivel mundial. Sin embargo, su electrónica de potencia introduce armónicos en la red de distribución eléctrica, lo que puede generar problemas de sobrecalentamiento en transformadores, resonancias no deseadas y pérdida de eficiencia energética [3]. Estudios han demostrado que la distorsión armónica total (THD) en luminarias LED puede superar el 70% en comparación con el 15% registrado en luminarias de sodio [4]. Esto resalta la necesidad de realizar un análisis comparativo entre distintas tecnologías de iluminación para evaluar su impacto en la calidad de la energía.

### **2.1 SITUACIÓN PROBLÉMICA**

Los sistemas de iluminación están evolucionando en la actualidad. Dado que la iluminación representa entre el 20% y el 25% del consumo total de energía eléctrica a nivel mundial, su eficiencia energética es de vital importancia[3]. Así como el uso general de luminarias de sodio genera diversas perturbaciones en la red eléctrica debido a su electrónica. La presencia de estos fenómenos puede causar problemas en los sistemas eléctricos, como el aumento de la temperatura en el cableado debido a las pérdidas en los transformadores, variaciones de corriente de las luminarias y daños en los equipos eléctricos [5].

Las luminarias que utilizan gases a presiones considerables presentan los siguientes elementos: lámpara, balasto, arrancador y capacitores de corrección de potencia. El balasto es componente

esencial en que limita y estabiliza la corriente eléctrica suministrada a la luminaria, evitando daños y por sobre corriente durante el encendido y operación; existen balastos electromagnéticos y electrónicos. Sin embargo, al ser una carga no lineal, el balasto genera distorsión armónica en la red eléctrica, contribuyendo a la degradación de la calidad de energía. Estos armónicos pueden provocar sobrecalentamiento de transformadores, aumento de pérdidas en líneas y resonancia no deseadas en el sistema de distribución [5], [6], [7].

## **2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál es el impacto de diferentes tecnologías de iluminación en los niveles de armónicos en la red de distribución eléctrica?

## **2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.3.1 Objeto de Investigación**

Armónicos en la red de Distribución: Comparación de diferentes tecnologías de iluminación.

### **2.3.2 Campo de Acción**

3306 ingeniería y Tecnología eléctrica /3306.04 Iluminación eléctrica /3306.09 Transmisión y Distribución

## **2.4 BENEFICIARIOS**

### **2.4.1 Directo**

- Empresa Eléctrica.

### **2.4.2 Indirecto**

- Usuarios de la red de distribución eléctrica

## **2.5 JUSTIFICACIÓN**

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad analizar el comportamiento de la red ante la introducción de armónicos en el sistema de alumbrado público y verificar que los parámetros se mantengan dentro de los límites establecidos por la norma vigente. Además, se analizará el cumplimiento con normativas de regulación nacional e internacional. Del mismo

modo, se busca simular un sistema para observar el comportamiento del mismo con presencia de perturbaciones.

La problemática en la calidad de energía en la red, originada por la introducción de armónicos por cargas no lineales, donde se encuentran incluidas las diversas tecnologías de iluminación que producen distorsiones armónicas por sus arrancadores o drives. Por ello, se propone realizar un análisis comparativo de diferentes tecnologías de iluminación utilizadas en el sistema de alumbrado público, con un enfoque en la generación de las perturbaciones armónicas y su impacto en el desempeño de la red eléctrica.

La evolución en las tecnologías de iluminación a lo largo de los desde la invención de la luminaria incandescente ha impulsado una transformación significativa en la industria, marcada por la adopción de la tecnología LED como remplazo de sistemas tradicionales, debido a sus ventajas económicas y de eficiencia energética. No obstante, la transición de tecnologías de iluminación convencionales puede generar impactos tanto positivos como negativos en la red eléctrica [8].

Las tecnologías de iluminación que requieren arrancadores o drivers se han ganado popularidad en los sistemas de iluminación gracias a su sostenibilidad ambiental, larga vida útil, bajo consumo energético y alta eficiencia lumínica. No obstante, estas tecnologías introducen distorsión armónica en la red eléctrica, derivada de la naturaleza no lineal de sus componentes electrónicos, como convertidores de potencia y circuitos de conmutación, lo que deteriora la calidad de la energía y puede provocar resonancias, sobrecalentamiento de equipos y pérdidas adicionales en el sistema [9].

En este contexto, la investigación se enfocará en el análisis del comportamiento armónico de las luminarias empleadas en el alumbrado público, evaluando la generación de armónicos, el factor de potencia y las perturbaciones asociadas, con el objetivo de mitigar los efectos adversos en la red de distribución.

## **2.6 HIPÓTESIS**

El cambio de tecnología de iluminación permitirá reducir la cantidad de armónicos generados a la red de distribución.

## **2.7 OBJETIVOS**

### **2.7.1 General**

Evaluar la influencia de los armónicos generados por diferentes tecnologías de iluminación utilizando mediciones y simulaciones con la finalidad de observar el comportamiento al ingresar en la red de alumbrado.

### **2.7.2 Específicos**

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la introducción de armónicos causados por las diferentes tecnologías de iluminación en la red de distribución.
- Identificar la introducción de armónicos por diferentes tipos de tecnologías de iluminación en condiciones normales de operación, utilizando herramientas de simulación para modelar estas tecnologías y su impacto en la red de distribución.
- Analizar el aspecto económico del cambio de tecnología de iluminación desde el punto de vista de armónicos.

## 2.8 SISTEMAS DE TAREAS

En la Tabla 1 se muestra el sistema de tareas del proyecto de investigación.

Tabla 1. Ejemplo del Sistema de Tareas del Proyecto de Investigación.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Realizar una revisión bibliográfica sobre la introducción de armónicos por las diferentes tecnologías de iluminación en la red de distribución	Investigar en diversas fuentes bibliográficas relacionadas a la producción de armónicos y sus afecciones a la red de distribución	Fundamentación teórica relacionada con los estudios armónicos producidos por los sistemas de iluminación en la red de distribución	Revisión bibliográfica
Identificar la introducción de armónicos por diferentes tipos de tecnologías de iluminación en condiciones normales de operación, utilizando herramientas de simulación para modelar estas tecnologías y su impacto en la red de distribución.	Utilizar el analizador de red disponible para medir la producción de armónicos por las diferentes tecnologías de iluminación. Utilizar un software para la simulación de armónicos producido por diferentes tecnologías de iluminación.	Base de datos de generación de armónicos dado por el analizador de red.  Software de simulación por los sistemas de iluminación.	Analizador de calidad de energía. Software especializado.
Analizar el aspecto económico del cambio de tecnología de iluminación desde el punto de vista de armónicos.	Investigar costos relacionados a mantenimiento de reemplazos de tecnología de iluminación.	Base de datos de costos, beneficios e inversión.	Análisis de los resultados.

### 3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La fundamentación teórica del proyecto de investigación, expone conceptos fundamentales a criterios de iluminación, analizando las diferentes tecnologías de iluminación, el comportamiento del sistema de alumbrado público ante perturbaciones y el mantenimiento de luminarias. Además, se revisarán estudios y normativas relacionadas al análisis de armónicos.

#### 3.1 CRITERIOS GENERALES DE ILUMINACIÓN

Los criterios generales de iluminación en los sistemas de alumbrado ayudan a garantizar un ambiente visualmente cómodo, eficiente y seguro, tal como flujo luminoso, intensidad luminosa, iluminancia, etc. Contribuyendo en mejorar el rendimiento en actividades a las personas, en entornos residenciales, comerciales e industriales.

##### 3.1.1 Parámetros de Iluminación

A continuación, en la Tabla 2 y Tabla 3 se resumen los parámetros de iluminación más significativos, presentando también sus respectivas fórmulas de cálculo.

Tabla 2. Parámetros de iluminación, parte A [10].

Parámetro	Características	Formulación
Flujo luminoso	Se refiere a la medida de la cantidad de luz emitida por una fuente por minuto. La unidad de medida es el lumen (lm) [10]. La fórmula se presenta en la ecuación (1).	$\Phi = \frac{Q}{t} \quad (1)$ <p>Donde:</p> <p><math>\Phi</math>: Flujo luminoso en lúmenes (lm)</p> <p>Q: Cantidad de luz emitida por una fuente de luz (lm * s)</p> <p>t: Unidad de tiempo</p>
Intensidad luminosa	Se refiere a la cantidad de luz emitida por una fuente homogénea en una dirección específica, y la medida se expresa en candelas (cd). Además, puede describirse como la relación entre el flujo luminoso y el ángulo sólido [10]. La fórmula se encuentra en la ecuación (2).	$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2)$ <p>Donde:</p> <p>I: Intensidad luminosa en candelas (cd)</p> <p><math>\Phi</math>: Flujo luminoso en lúmenes (lm)</p> <p><math>\omega</math>: Ángulo sólido estereorradianes (sr)</p>
Iluminancia (Nivel de iluminación)	Se refiere a la densidad de luz que impacta en una superficie. Si la superficie se mide en metros cuadrados, la unidad utilizada es el lux (lx) [10]. La fórmula se presenta en la ecuación (3).	$E = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$ <p>Donde:</p> <p>E: Iluminancia en lux (lx).</p> <p><math>\Phi</math>: Flujo luminoso en lúmenes (lm)</p> <p>A: Área de la superficie afectada por el flujo (m<sup>2</sup>)</p>
Iluminancia media	Se refiere a la media de los valores de iluminancia que se han medido o calculado en un área específica.	

Tabla 3. Parámetros de iluminación, parte B [10].

Luminancia	<p>La luminancia se refiere a la cantidad de luz que una superficie luminosa o iluminada emite en una dirección, actuando como fuente de luz secundaria. Este cuantifica el impacto de la luz generada por una superficie en el ojo humano [10]. La ecuación (4) presenta la fórmula correspondiente, y su unidad de medida es cd/m<sup>2</sup>.</p>	$L = \frac{I * \alpha}{A * \cos \alpha} \quad (4)$ <p>Donde:</p> <p>L: luminancia en candela sobre metros cuadrado (cd/m<sup>2</sup>)</p> <p>I * α: Intensidad luminosa en candelas en la dirección emitida</p> <p>A: Área de la fuente en metros cuadrados (m<sup>2</sup>)</p> <p>α: Ángulo comprendido entre el ojo del observador y la recta normal de la fuente</p>
	<p>Por otro lado, la luminosidad es un factor clave para evaluar el deslumbramiento, ya que influye en la percepción de la claridad de una superficie [10]. En esencia, se determina a partir de la iluminancia en la superficie y su nivel de reflexión, utilizando la ecuación (5).</p>	$L = \frac{\rho * E}{\pi} \quad (5)$ <p>Donde:</p> <p>L: luminancia en candela sobre metros cuadrado (cd/m<sup>2</sup>)</p> <p>ρ: Grado de reflexión de una superficie.</p> <p>E: iluminancia en lux (lx)</p> <p>π: 3.14159</p>
Eficacia luminosa	<p>Se refiere a la relación entre la cantidad total de luz emitida y la potencia total utilizada [10]. Para una luminaria eléctrica, esta eficiencia se cuantifica en lúmenes por watt (lm/W). Esta relación se expresa en la ecuación (6).</p>	$\varepsilon = \frac{\Phi}{P} \quad (6)$ <p>Donde:</p> <p>ε: Eficiencia luminosa (lm/W)</p> <p>Φ: Flujo luminoso en lúmenes (lm)</p> <p>P: Potencia activa de la fuente (W)</p>
Factor de uniformidad media	<p>Es la relación entre la iluminancia mínima y la media [10].</p>	
Factor de uniformidad extrema	<p>Es la relación entre la iluminancia mínima y máxima [10].</p>	
Factor de uniformidad longitudinal	<p>Es la relación entre luminancia mínima y máxima longitudinal [10].</p>	
Factor de uniformidad general	<p>Es la relación entre la luminancia mínima y media [10]</p>	

## 3.2 ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN

### 3.2.1 Tecnología de descarga

Es una lámpara que produce luz directa o indirecta mediante una descarga eléctrica de gas, vapor metal o una mezcla de ambos [10].

Las luminarias de alta intensidad son aquellas en las que el arco emisor de luz se estabiliza mediante el calor generador por la estructura. Estos han experimentado un tremendo crecimiento debido a diversos avances tecnológicos como:

- Tiene mejor rendimiento lumínico.
- Proporciona una fuente luminosa compacta.

Las luminarias de descarga de alta intensidad se clasifican según la combinación de gases y la presión en el tubo de descarga, como lo siguiente:

- Luminarias de vapor de mercurio a alta presión.
- Luminarias de vapor de sodio a alta presión.
- Luminarias de halogenuro metálico (o de mercurio con aditivos metálicos).
- Luminarias de vapor de sodio de baja presión.

Al igual que todas las luminarias de descargas, interceptan la corriente y ralentizan a medida que se acumula. Por lo tanto, no se pueden conectar directamente a la red sin reactor que controle el suministro de energía. La mayoría de las luces de alta intensidad requieren un dispositivo que pueda proporcionar la intensidad de luz necesaria. Sin embargo, algunas luminarias, como las de mercurio tienen un electrodo auxiliar que mantiene la luz procedente de una red de corriente alterna con un voltaje de 220 V o más, sin utilizar arrancador [10].

#### **Mercurio de alta presión**

Este tipo de luminaria tiene doble cobertura. La carcasa interior o tubo de descarga contiene gas argón y mercurio, y la carcasa exterior protege el tubo de descarga de las corrientes de aire y las variaciones de temperatura externa. Además, alberga un gas interno para evitar oxidación [10], [11].

La iluminación con luminarias de mercurio de alta presión es muy utilizada dentro del alumbrado público, naves industriales y lugares poco accesibles, su eficacia luminosa depende de la potencia de la luminaria, así como su vida útil, tal como se muestra en la Tabla 4 [10].

Tabla 4. Características de luminarias de mercurio de alta presión [10].

Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)	Eficacia luminosa (lm/w)	Vida útil funcionamiento(80%)
80	3700	46,3	16000
125	6200	49,6	
250	12700	50,8	
400	22000	55,0	14000
700	38500	55,0	12000
1000	58500	58,5	

En cuanto a la depreciación del flujo luminoso en estas luminarias, entre 80 W y 250 W la reducción de lúmenes se puede apreciar transcurrido 16000 horas de funcionamiento es decir al bajar del 20 % del flujo luminoso inicial [10].

### Sodio de baja presión

Esta luminaria convierte la radiación ultravioleta producida por descarga de sodio en radiación visible, utilizando un polvo fluorescente en la superficie interna, produciendo una luz amarilla, son muy utilizadas en el alumbrado exterior [10], [11] . La reproducción del color es más baja que el resto de luminarias de descarga sin embargo tiene mayor eficacia y larga vida útil.

Debido a que las luminarias requieren entre 400 y 680 V ac requiere un equipo auxiliar del tipo autotransformador de dispersión, su diseño depende de la potencia, así como la eficacia luminosa. A continuación, se presentan algunas características en la Tabla 5 [10].

Tabla 5. Características de luminarias de sodio baja presión [10].

Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)	Eficacia luminosa (lm/w)
18	1800	100,0
335	46000	131,4
55	8100	147,3
90	13000	144,4
135	22500	166,7
180	32000	177,8

Su vida útil puede llegar a ser de 22000 horas esto se debe a sus reducidas fallas, siendo así que su depreciación del flujo luminoso en toda su vida útil [10].

### Sodio de alta presión

Estas luminarias están hechas de tubos de salida de óxido de aluminio que pueden soportar temperaturas de hasta 1000 °C y pueden soportar los efectos químicos del vapor de sodio a tales temperaturas. Además, proporciona la transmisión del 90% de la luz visible generada por su descarga eléctrica interna [10].

Su uso es tanto para exteriores como interiores, sin embargo, por su eficacia luminosa han sido mayormente utilizadas en el alumbrado público [10].

Para el encendido de las luminarias se utilizan reactancias y arrancadores debido a sus altas tensiones superiores a la red. Su periodo de arranque dura entre 5 y 7 minutos [10], [11].

Debido a su eficacia luminosa es muy utilizada en alumbrado público dependiendo de su potencia como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Características de luminarias de sodio de alta presión [10].

Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)	Eficacia lumínica
70	6000	85,7
127	15000	102,0
250	28000	112,0
392	48000	122,4
1000	130000	130,0

La vida útil para este tipo de luminarias está limitada por el aumento de la tensión de arco teniendo una duración de 30000 horas, este tipo de luminaria reduce su flujo luminoso aproximadamente a 20000 horas de funcionamiento [10].

A lo largo de la vida útil de la luminaria, su tensión de arco se mantendrá en el valor inicial hasta alcanzar aproximadamente 140 V. A partir de este momento el voltaje ya no es estable y como resultado se apaga [10].

### Haluros Metálicos

La luminaria se caracteriza por una alta presión de descarga, alta potencia y excelente reproducción cromática. Se trata de lámparas de vapor de mercurio de alta presión que contienen haluros de tierras raras como disprosio, holmio y tulio. Su uso es tanto doméstico como comercial, generalmente en estudios de televisión y campos deportivos por su buena reproducción de colores [10], [11].

Su eficacia luminosa depende de su potencia a mayor potencia, mayor flujo luminoso y mayor eficacia luminosa como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de luminarias de haluros metálicos [10].

Potencia (W)	Flujo luminoso (Lm)	Eficacia luminosa (lm/W)
70	5500	78,6
150	13500	90,0
250	20000	80,0
400	40000	100
1000	90000	90,0

La vida útil de este tipo de luminaria está entre 9000 a 10000 debido a las altas temperaturas de los electrodos, los óxidos que contiene se evaporan rápidamente. Su depreciación luminosa es mayor en comparación a las de mercurio de alta presión se considera que es notable a las 10000 horas de uso es decir al 70% de su capacidad [10].

Para su arranque se necesitan tensiones elevadas exceptuando algunos casos estas tensiones pico oscilan entre 0,8 y 5 kV [10].

### **Haluros metálicos cerámicos**

Esta tecnología combina haluros metálicos tradicionales con sodio de alta presión. El uso de este quemador de cerámica prolonga su vida útil hasta 15 horas y también mejora el brillo y la estabilidad del color durante el funcionamiento [10].

Son luminarias muy adecuadas para usos en sectores de comercio, oficinas, iluminación arquitectónica, escaparates, hoteles, etc. Este equipo requiere equipo auxiliar para su encendido y regulación de flujo luminosos debido a su voltaje, se presenta una mejora eficacia luminosa como se observa en la Tabla 8 [10].

Alcanza su vida útil de 12000 horas esto es debido a su quemador cerámico que aumenta la vida de la luminaria. Su depreciación luminosa es de 20% de su flujo inicial y es notorio casi al final de su vida útil [10].

Tabla 8. Características de luminarias de halogenuros metálicos [10].

Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)	Eficacia luminosa (lm/W)
60	6900	115
70	7500	107
90	10450	116
100	10700	107
140	16500	118
150	16500	110
210	24200	115
150	28300	113
315	73800	120
400	40000	100

### Inducción

En una luminaria de inducción, el gas emisor es excitado por energía eléctrica en forma de un campo electromagnético de alta frecuencia, lo que elimina la necesidad de electrodos. La ausencia de electrodos en este tipo de lámparas es un factor clave en su longevidad, que alcanza unas 60.000 horas [10], [11]. Si comparamos una bombilla de descarga con una bombilla de inducción, la bombilla de inducción es el devanado principal, que es excitada por un generador de alta frecuencia. El devanado secundario se caracteriza por la ionización de gas a baja presión [12]. La radiación ultravioleta genera durante la descarga provoca una capa de polvo fluorescente en la parte interior de la luminaria, produciendo luz blanca.

El generador de alta frecuencia de la luminaria de inducción incluye un oscilador que suministra energía a la antena, iniciando y manteniendo la salida en el gas. Su función es asegurar el funcionamiento estable del oscilador y el flujo de energía en el punto de conexión. Generalmente está encerrado en una carcasa metálica para aislar interferencias de radio y disipar el calor, proporcionando una mayor durabilidad. Este generador tiene una frecuencia de salida cercana a 2.6 MHz [13].

Tabla 9. Comparativa de luminarias de inducción [10].

Potencia (W)	Flujo luminoso (lm)	Eficacia Luminosa (lm/W)
100	8000	80
150	12000	80

Como se muestra en la Tabla 9, la eficiencia luminosa de las luminarias de inducción es de un aproximado de 80 lm/W. Esta tecnología alcanza niveles de eficiencia comparables a las luminarias de descarga, como los halogenuros metálicos y un flujo luminoso para luminarias de inducción magnética con potencias de 100W y 150W [12].

### **Tecnología LED**

Una luminaria LED es una luminaria que emplea diodos emisores de luz, conocida como light emitting diode (LED), como una fuente de iluminación. Esta luz es emitida por un solo LED y dado que no es muy intensa estas luminarias están formadas por conjuntos de LEDs logrando una intensidad luminosa comparable a otros tipos de luminarias [14].

La tecnología LED tiene mucha aceptación, tal que, la utilización de estas no puede ser tan beneficiosa en aspectos sociales y medioambientales. Por eso, es importante evaluar y considerar los beneficios y riesgos de esta tecnología. Esta fuente de iluminación tiene su uso en zonas exteriores capaz de proporcionar una adecuada iluminación, en las empresas de iluminación en la parte de arquitectura de sistema de control a través de interconexiones alámbricas o inalámbricas para vincular esta tecnología de iluminación a sensores, interruptores y reguladores, en el campo de la horticultura que busca la capacidad que se adapte y ajuste la fuente de iluminación en base a el crecimiento de plantas y en el campo de la salud humana su uso no solo permite la visión sino también para señales críticas de sistemas biológicos afectando a los ritmos cadianos, respuesta de las pupilas, entre otras [15].

Estos diodos emisores de luz (LED) requieren de un componente auxiliar, denominado driver, para funcionar de manera eficaz. Además, en cuanto armónicos, este dispositivo electrónico busca mantener el factor de potencia y la distorsión armónica (THDi) dentro de límites establecidos según la normativa [5].

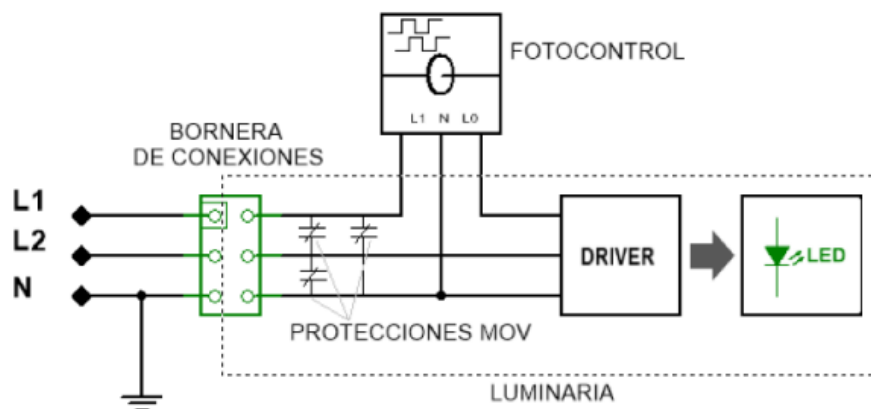


Figura 1. Componentes de luminaria LED [5].

En la Figura 1 se observa los diferentes componentes de una luminaria LED.

El flujo de corriente en la tecnología LED no es completamente sinusoidal debido a dicho componente driver, generando armónicos que deterioran la calidad de la energía de la red eléctrica. Estos armónicos pueden distorsionar las formas de onda, provocar el sobrecalentamiento de los equipos eléctricos y reducir la eficiencia en la transmisión y distribución de energía [16].

### Comparación entre tecnologías

En la Tabla 10 y Tabla 11 se da a conocer la comparación de tecnologías entre ventajas y desventajas.

Tabla 10. Comparación de tecnologías, parte A [17].

Tecnología	Ventaja	Desventaja
LED	<ul style="list-style-type: none"> <li>Luminosidad</li> <li>Costos de funcionamiento más bajos</li> <li>Larga vida útil</li> <li>Menor disipación de energía</li> <li>Ausencia de mercurio</li> <li>Encendido al instante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere equipos de control (Controlador) para su operación</li> <li>Elevado costo inicial relativo</li> <li>Requiere un diseño térmico adecuado porque el calor residual se conduce, no se proyecta</li> </ul>
Descarga de alta densidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>Costos bajos de operación</li> <li>Alta eficiencia de las lámparas de haluro/aditivos metálicos y vapor de sodio de alta presión</li> <li>Larga vida útil</li> <li>Alto flujo luminosos en un pequeño espacio</li> <li>Diversos rangos de reproducción cromática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere equipo de control (balasto) para operar</li> <li>Puede tardar en el reencendido</li> <li>Puede tardar unos minutos en alcanzar su máximo brillo</li> <li>Los encendidos y apagados frecuentes acortan su vida útil</li> <li>Para regular la intensidad de la luz se requiere un balasto especial</li> <li>Contienen mercurio</li> </ul>
Incandescente y halógenas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bajo precio de compra</li> <li>Óptima reproducción cromática</li> <li>No requiere equipo de control</li> <li>Fácil regulación de intensidad de la luz</li> <li>Posición de funcionamiento universal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alto consumo de operación</li> <li>Eficacia reducida</li> <li>Alta temperatura de operación</li> </ul>

Tabla 11. Comparación de tecnologías, parte B [17].

<b>Tecnología</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Desventaja</b>
CFL (Descarga de baja densidad)	Costos de operación bajos Alta eficacia Larga vida de operación Excelente reproducción cromática	Requiere equipo de control para su operación Los encendidos y apagados frecuentes pueden acortar su vida útil Para regular su intensidad de la luz se requiere de un balasto especial Contiene mercurio

### Comparativa entre las diferentes luminarias

En la Tabla 12 se da a conocer las diferentes luminarias tales como su aplicación, costo inicial, vida útil, arranque y espera de encendido.

Tabla 12. Comparación de luminarias [10].

<b>Tipo de luminaria</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Costo inicial</b>	<b>Vida útil (horas)</b>	<b>Arranque</b>	<b>Espera encendido</b>
Vapor de mercurio	Grandes áreas industriales, bodegas, patios, grandes alturas de montaje	Alto	25000	> 10 s.	> 20 s.
Vapor de mercurio con halogenuros/haluros metálicos	Grandes áreas a grandes alturas, donde se necesita buen rendimiento de color	Alto	10000	5 - 10 min.	> 5 min.
Vapor de sodio de alta presión	Grandes alturas de montaje, patios de maniobras, autopistas, avenidas, estadios, etc. Regular el rendimiento de color	Alto	25000	> 15 s.	> 3 min.
Vapor de sodio de baja presión	Autopistas, avenidas y lugares donde no sea primordial el color, pero si buena visibilidad	Alto	25000	> 5 s.	No
Inducción magnética	Autopistas, avenidas, túneles, parques, industrias, oficinas, centros comerciales, buen rendimiento del color		60000 - 100000	Instantáneo	No
LED	Decorativo, residencial, autopistas, avenidas, parques, industria, oficinas, centros comerciales. Buen rendimiento de calor	Muy alto	50000	Instantáneo	No

### **3.3    NORMATIVA**

A pesar de las tecnologías de iluminación tienden a ser más eficientes, esto debe cumplir normativas que garanticen el funcionamiento de la red eléctrica de distribución, como se verá a continuación serán normativas que son muy importantes, normativas internacionales y normativas nacionales, que son tomadas en cuenta en la parte de iluminación entre ellas tenemos la CIE 140 y CIE 88 como normativa internacional y Regulación ARCERNRR-007/23 como normativa internacional.

#### **3.3.1   Normativa Internacional**

La normativa CIE (International Commission on Illumination) 140 abarca cálculo de luminancia e iluminancia y muestra convenciones sobre disposición de puntos en cuadrícula de cálculo y la posición del observador [18]. La CIE 88 se refiere más a zonas interiores de túneles largos y muy largos, demuestra que la influencia del volumen de tráfico era mayor de lo anticipado y de los equipos modernos pueden mostrar un nivel de confort y visibilidad similar a una menor altura de los niveles de luminancia [19], [20]. La CIE 154 examina factores que pueden afectar al mantenimiento de luminarias, contiene datos prácticos para obtener el factor de mantenimiento en diversos sistemas y entornos aplicando fórmulas de cálculo de esquemas de iluminación, además aborda elementos mecánicos que sostienen las luminarias [20]. La CIE 97 aborda factores que influyen en el factor de mantenimiento, presentando datos basados en soluciones prácticas que permiten obtener el valor correspondiente para distintos tipos de sistemas, edificios y ubicaciones, utilizando formulas en el cálculo de esquemas de iluminación tales como iluminancia y luminancia en áreas o puntos. También hay métodos para calcular intervalos de mantenimiento óptimo y recomendaciones para técnicas de limpieza [21].

#### **3.3.2   Normativa Nacional**

Las empresas distribuidoras de la prestación del Servicio de Alumbrado Público General (SAPG) deben cumplir con los parámetros técnicos establecidos en la Regulación Nro. ARCERNRR-007/23 “Prestación del Servicio de Alumbrado Público General”, teniendo cuatro secciones definidas, que son: vías para tráfico motorizado, vías para tráfico peatonal, vías en zonas de conflicto, túneles y para canchas de los escenarios deportivos [22]. Esta normativa se encuentra basada en la CIE 140 y CIE 88.

### **3.3.2.1 Vías para tráfico motorizado**

Las clases de iluminación para vías de tráfico motorizado se clasifican en M1 a M6, y sus especificaciones se determinan según su categorización como Alta, Media y Baja según la cantidad de vehículos por hora [6].

Los parámetros fotométricos para las vías con tráfico motorizado (M1 a M6) se especifican según la luminancia promedio, factor de uniformidad mínimo, factor de uniformidad longitudinal, relación de alrededores, entre otras. Dependiendo de las características de la superficie, ya sea superficies de asfalto, superficies que contienen grava, superficie con textura rugosa, superficies asfálticas, etc. según su característica se clasifica de R1 a R4 [22].

### **3.3.2.2 Vías para tráfico peatonal**

Las clases de alumbrado tipo P están diseñadas para asegurar una buena visibilidad tanto a peatones en aceras u otras superficies, como a ciclistas en ciclovías, bermas, carriles de estacionamiento, y zonas separadas o adyacentes a la calzada destinada al tráfico vehicular [22].

Los parámetros fotométricos para tráfico peatonal van de acuerdo a la iluminancia con su valor promedio horizontal máximo, valor promedio horizontal mínimo y valor horizontal mínimo [22].

### **3.3.2.3 Vías en zonas de conflicto**

Las zonas de conflicto se refieren a aquellas áreas con un alto riesgo de colisión entre vehículos o entre vehículos y otros elementos, como objetos fijos, peatones, ciclistas u otros usuarios que circulen por dichas zonas. Donde el alumbrado tipo C se clasifica en seis categorías de C0 a C5 y cuando se disponga de información sobre las clases de alumbrado tipo M presentes en un área de conflicto, la clase de alumbrado tipo C se lo determinará de acuerdo a ello [22].

### **3.3.2.4 Túneles**

Para el área de los túneles se toma en cuenta la normativa CIE 88 [22].

### **3.3.2.5 Canchas de escenarios deportivos**

Para las canchas de escenarios deportivos estas deben cumplir con niveles de iluminancia como iluminancia promedio que puede ser máxima o mínima y uniformidad de la iluminancia, esto según puede ser para canchas deportivas de uso múltiple y recreativo, canchas recreativas de fútbol y canchas recreativas de baloncesto y ecuavóley [22].

### **3.4 MANTENIMIENTO DE LUMINARIAS**

En la sociedad se ha visto una creciente dependencia del suministro eléctrico, impulsando en el desarrollo de los sistemas de generación, transmisión y distribución, manteniendo la calidad y confiabilidad. En la actualidad, la calidad de servicio se ha convertido en un punto importante de investigación para las empresas eléctricas, debido a su gran importancia y responsabilidad hacia el usuario final, quienes son afectados por las distorsiones en las ondas de los parámetros eléctricos.

El creciente mercado de las nuevas tecnologías de iluminación ayuda a la reducción de consumo y una gran eficiencia, relacionadas con el mantenimiento adecuado de los parámetros de calidad de la electricidad en las redes de suministro eléctrico. Una de las causas del deterioro de la calidad eléctrica en redes que incorporan fuentes LED es el empleo de rectificadores, tales como fuente de alimentación conmutadas o sistemas de conversión electrónica, que están vinculados al funcionamiento de estas. Estos dispositivos representan cargas no lineales, lo que provoca distorsiones en las formas de onda de corriente y voltaje, así como la aparición de armónicos de mayor orden en las redes eléctricas [23].

#### **3.4.1 Mantenimiento para sistemas de iluminación exterior**

Todos los sistemas de iluminación experimentan un desgaste gradual desde el momento en que empieza a funcionar. Las pérdidas de rendimiento se deben a la acumulación de polvo y suciedad en las superficies expuestas de luminarias y luminarias, lo cual disminuye la transparencia o capacidad de reflexión, además de la reducción de la potencia lumínica y la posible falla de las luminarias[20].

Incluso con un programa de mantenimiento eficiente, es inevitable cierta pérdida de iluminación debido al desgaste del equipo, por lo que se debe preverse al momento de planificar el esquema de iluminación[20].

En la Tabla 13 se muestra sus causas y sus recomendaciones de mantenimiento para luminarias.

De igual manera para sistemas de iluminación interior existe factores que contribuyen negativamente a su funcionamiento, por lo que, un mantenimiento regular es esencial para un sistema de iluminación eficaz, teniendo en cuenta su factor de mantenimiento, iluminancia necesaria, vida útil, etc. Es un tema que no se tratará a profundidad, debido a que se estudia para iluminación exterior[21].

Tabla 13. Causas y recomendaciones de mantenimiento de luminarias exterior [20].

Factores	Desgaste
Depreciación luminosa	Existen varios factores que influyen en la pérdida de luz, cuyo efecto y magnitud varía según la tecnología de la luminaria, luminaria, la disposición de instalación y entorno. Por lo que es crucial identificar y establecer requisitos de limpieza.
“Vida” de la luminaria	Esto se refiere a la probabilidad de que siga funcionando durante un tiempo determinado, esta tasa de vida útil depende de la tecnología de la luminaria.
Acumulación de suciedad en luminarias y luminarias	La acumulación de suciedad en luminarias es una de las principales causas de las pérdidas de luz. El grado de pérdida lumínica depende tanto de la cantidad y el tipo de suciedad presente en el ambiente, como el diseño de la luminaria y del tipo de luminaria utilizada. Para reducir la acumulación de suciedad en las superficies reflectantes es recomendable sellar el compartimiento de la luminaria para evitar la entrada de polvo y suciedad.
Depreciación a largo plazo de los materiales del reflector y difusor	<p>Vidrio: El mantenimiento del vidrio es fácil de limpiar, lo que permite recuperar su acabado original, la falta de mantenimiento puede dificultar la restauración, provocando emisión luminosa y altera la distribución de la luz debido a la difusión, causando niveles de iluminación bajos y una degradación en la uniformidad. Plásticos: Acrílico (PMMA, polimetilmetacrilato) y policarbonato (PC). La degradación de estos materiales suele ser consecuencia de la acumulación de suciedad y contaminantes atmosféricos, así como el envejecimiento natural del plástico. Una limpieza regular con detergente suave y agua permite recuperar la transparencia del plástico.</p> <p>Aluminio: La superficie reflectante del aluminio tiende a degradarse por oxidación a menos que cuente con una protección adecuada. El método más común para protegerla es el anodizado, que consiste en la formación de una capa de óxido controlada y sellada.</p> <p>La exposición a ambientes húmedos puede provocar corrosión localizada en la superficie y una disminución gradual de la reflectancia y la specularidad. Resulta menor salida de luz y en una degradación del patrón de distribución lumínica. Para su limpieza se puede utilizar tejidos de fibra aglomerada o gamuza. La protección de plásticos metalizados generalmente se aplica una laca sobre la superficie de aluminio.</p>

### 3.4.2 Curva de la Bañera aplicada a luminarias

La curva de la bañera es un diagrama polar que se obtiene midiendo la intensidad de la luz en diferentes ángulos alrededor y representando gráficamente en coordenadas polares. La distancia entre cualquier punto de la curva y el centro indica la intensidad luminosa de la fuente en esa dirección (mayor distancia, mayor intensidad). Estas mediciones se realizan en distintos planos verticales de la luminaria, ya que la emisión de luz puede variar entre los planos, dependiendo del tipo de luminaria [24].

En una instalación de luminarias, si no hay un control en el proceso, la eficiencia lumínica se reducirá significativamente, haciendo que el sistema sea inseguro, de ello, existen elementos que pueden reducir la emisión de luz, clasificados en factores de depreciación recuperable y no recuperable, como el envejecimiento, son propios de la instalación y el ambiente, y no se puede revertir ni es viable corregirlos en el mantenimiento habitual[20].

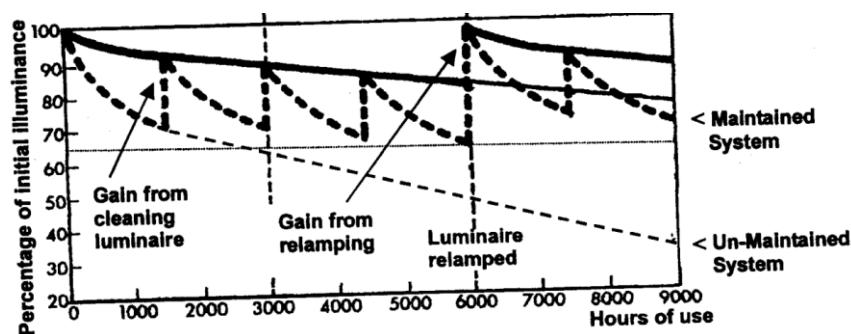


Figura 2. Porcentajes de iluminación inicial [20].

Como se muestra en la Figura 2 si la disminución de la potencia lumínica es progresiva, el deterioro puede pasar inadvertido al inicio, pero con el tiempo afectará el desarrollo adecuado de las actividades. Así como factores de voltaje, frecuencia, temperatura o balasto, tienen un impacto permanente significativo, su magnitud debe estimarse durante el diseño. Y la efectividad de un programa de mantenimiento muestra que, sin mantenimiento, la depreciación podría llegar a un 65% del valor inicial en tres años, mientras que, con una limpieza adecuada, la reducción se mantendría por debajo del 40% [20].

### 3.4.3 Criterios de alumbrado público

El alumbrado público tiene como objetivo proporcionar iluminación a espacios exteriores. Este servicio impacta directamente la vida de los ciudadanos, ya que no solo mejora la seguridad vial sino también a la circulación de vehículos, permitiendo a las actividades comerciales, turísticas, recreativas, entre otras [6].

El alumbrado público es la iluminación de las vías públicas para el tránsito de personas y/o vehículos. No incluye la iluminación de áreas comunes de propiedades horizontales, la iluminación ornamental pública (como parques, plazas, espacios deportivos, iglesias, etc.), ni la iluminación intervenida [6].

### 3.5 CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La forma de onda de la energía eléctrica suministrada al usuario es sinusoidal. Sin embargo, durante el proceso de transmisión y distribución, esta onda puede experimentar interrupciones, sobretensiones, variaciones de tensión y niveles de distorsión armónica, entre otros. Cuando ocurren estos fenómenos, se considera que hay desviaciones en la tensión, corriente o frecuencia, lo cual provoca pérdidas de energía y afecta a la eficiencia del suministro eléctrico [5].

La calidad de energía eléctrica es muy importante ya que muestra la eficiencia que puede tener el sector eléctrico evitando gran parte las perturbaciones que son anomalías que afectan al suministro eléctrico, como por ejemplo la IEEE 1159 da información que ayudan a dar entendimiento de ello.

#### 3.5.1 Perturbaciones

Las perturbaciones según la IEEE 1159 se puede clasificar como se muestra en la siguiente Tabla 14 y Tabla 15.

Tabla 14. Perturbaciones eléctricas, parte A [25].

Perturbaciones	Definiciones
Transitorios	<p>Es la parte del cambio de una variable que desaparece durante la transición de una condición de funcionamiento estable a otra.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transitorio impulsivo</li> <li>• Transitorio oscilante</li> </ul>
Variación de corta duración	<p>Son causadas por condiciones de falla, activación de grandes cargas o conexiones sueltas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interrupciones momentáneas y temporales</li> <li>• Sags</li> <li>• Swells</li> </ul>

Tabla 15. Perturbaciones eléctricas, parte B [25].

Perturbaciones	Definiciones
Variación de larga duración	<p>Son causadas por variaciones de carga en el sistema y operación de conmutación.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Overtoltage</li> <li>• Undervoltage</li> <li>• Interrupción sostenida</li> </ul>
Desbalance	<p>Se define como la relación entre la magnitud de componente de secuencia negativa y la magnitud del componente de secuencia positiva, expresada en porcentaje.</p>
Distorsión de onda	<p>Se define como una desviación de estado estable de una frecuencia de potencia ideal sinusoidal.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• DC offset</li> <li>• Armónicos</li> <li>• Interarmónicos</li> <li>• Ruido</li> </ul>

### 3.5.2 Impactos de los sistemas de iluminación en la red eléctrica

Un sistema de iluminación busca proporcionar calidad lumínica y estética según el espacio y su uso. Sin embargo, los componentes electrónicos como balastos y drivers generan armónicos que afectan la calidad de la energía. En la red de distribución, las luminarias de sodio presentan una distorsión armónica distribuida en varios órdenes, con predominancia del tercer armónico. Las luminarias LED, aunque más eficientes y con encendido inmediato, también introducen una mayor distorsión del tercer armónico en la onda sinusoidal. Estudios indican que las LED tienen un factor de potencia cercano a 1, frente al 0,66 de las de sodio, pero generan niveles de armónicos superiores al 70%, comparados con el 15% de las de sodio. Esta variabilidad se debe a los drivers, que regulan la distorsión dentro de los límites normativos. Aunque las LED mejoran la eficiencia energética, su impacto en la calidad del suministro eléctrico requiere un análisis detallado para mitigar efectos adversos [5], [12], [16].

### 3.5.3 Armónicos

En la Tabla 16 se da información de diferentes fuentes bibliográficas sobre cómo afecta en la red los armónicos las luminarias de diferentes tecnologías.

Tabla 16. Comparación de diferentes tecnologías en la red [11], [26].

<b>Luminaria</b>	<b>Factor de potencia</b>	<b>Armónicos</b>
LED	Su factor de potencia mínima es de -0.1 y el máximo de 1 es decir su uso es más eficiente	Valor de bajos en armónicos de voltaje sin embargo tiene un alto porcentaje de armónicos de corriente superior al 70% en comparación a las luminarias de sodio [11], [26].
Vapor de sodio	Su factor de potencia oscila entre 0.58 y 0.66	Muestra bajos niveles de armónicos de voltaje contando con valores de THD de 15 %

#### **4. METODOLOGÍA**

En esta sección se desarrolla la metodología utilizada para analizar el comportamiento de luminarias con diferentes tecnologías. Para ello, se realizaron mediciones de la distorsión armónicas generadas por cada tipo de luminarias instaladas en el sistema.

Para llevar a cabo el estudio, se solicitó a la Universidad Técnica de Cotopaxi que nos facilitara el analizador de calidad de energía Fluke 435 II y a la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A el préstamo de las luminarias necesarias para la investigación. Se definieron los tipos de mediciones a realizar, el tiempo e intervalos de registro de datos, así con el tipo de medición. Una vez recopilado los datos, fueron procesados mediante la aplicación Power Log 430 II, específica para el analizador.

Posteriormente, los datos se tabularán en Microsoft Excel, permitiendo visualizar el con comportamiento de las luminarias a lo largo del tiempo establecido. En esta fase de análisis, se identificaron los armónicos representativos generados por cada tipo de luminaria, observándose que la mayor distorsión armónica ocurre en la corriente mientras que los valores de voltaje presentan una distorsión armónica dentro de los límites establecidos por la normativa, por ello no se tendrá una cobertura directa.

En la siguiente etapa de estudio, se establece una simulación de un sistema que incluye un transformador monofásico y un transformador trifásico, así como el sistema de la subestación San Rafael, dicha simulación se enfocara exclusivamente en el sistema trifásico, eliminando ramales monofásicos. Se propone tres escenarios para evaluar el impacto de las diferentes tecnologías de iluminación en la red eléctrica. En el escenario 1 se analiza el estado actual del sistema eléctrico con la infraestructura de alumbrado público existente, compuesto mayormente por luminarias de sodio. En el escenario 2 se presenta la transición de la tecnología predominante del sistema por otra que produzca menos cantidad de armónicos, se considera que la tecnología LED produce menor cantidad de armónicos. En el escenario 3 se presenta un sistema donde ya se ha cambiado en su totalidad la tecnología de iluminación del alumbrado público. En el escenario 4 el sistema tendrá una aleatoriedad de un total de 10 mediciones de armónicos diferentes para cada tecnología de iluminación de diferente potencia.

Estos escenarios permiten analizar el comportamiento de la red eléctrica ante la presencia de luminarias con diferentes niveles de emisión de armónicos, proporcionando información clave para evaluar el impacto del cambio de tecnología en el alumbrado público. El proceso de esta investigación se puede visualizar en el flujo grama de la Figura 3.

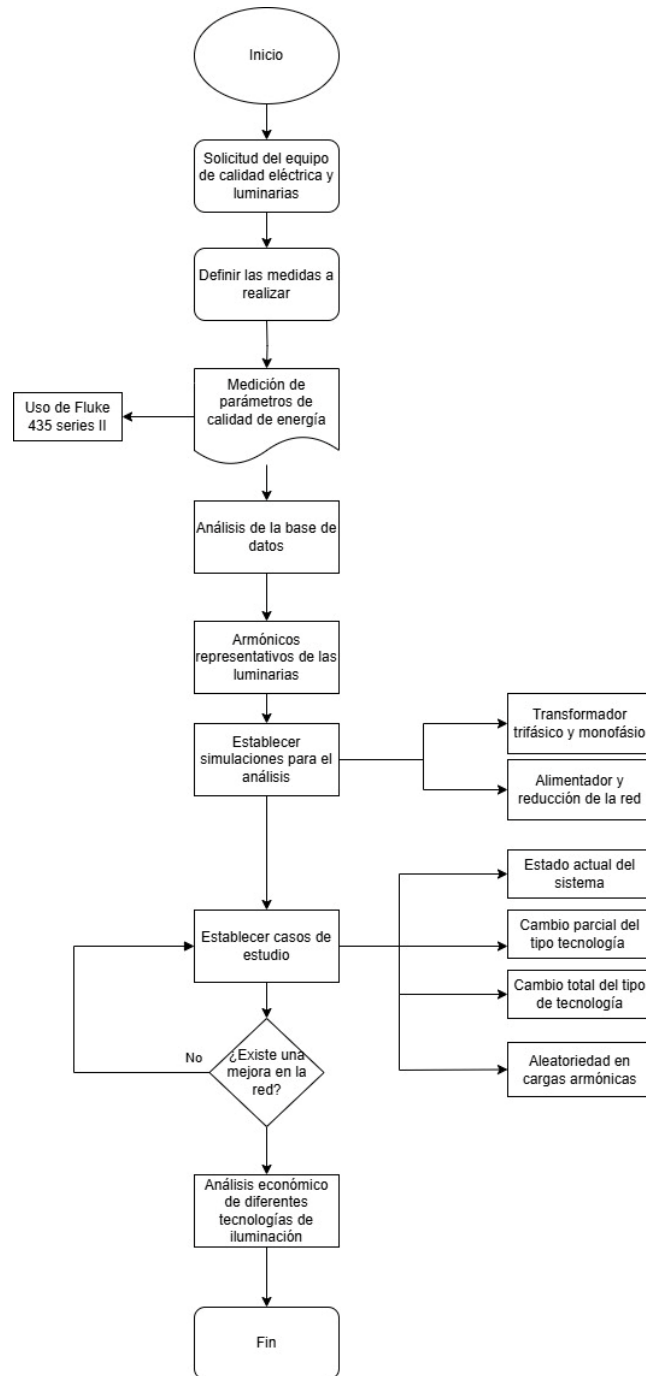


Figura 3. Diagrama de flujo.

#### 4.1 VIDA ÚTIL Y DESGASTE DE LAS LUMINARIAS.

Se analiza el comportamiento de las luminarias a lo largo de su vida útil. La vida útil nominal de una luminaria o fuente de luz según la norma ANSI/IES RP-16-102, se define como: “el tiempo de vida asignado a una luminaria de un tipo específico”. Esto generalmente se refiere a una estimación estadística de su vida operativa promedio resumido en la Tabla 17 [6].

Tabla 17. Vida útil de diferentes tecnologías de iluminación [6].

<b>Tipo de luminaria</b>	<b>Vida útil (horas)</b>
Incandescente	1000
Fluorescente	8000 - 10000
Vapor de mercurio	25000
Vapor de mercurio con halogenuros/haluros metálicos	10000
Vapor de sodio de alta presión	25000
Vapor de sodio de baja presión	25000
Inducción magnética	60000 - 100000
LED	50000

## **4.2 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ENERGÍA Y EL IMPACTO DE ARMÓNICOS EN RED**

Para determinar la producción de armónicos por diferentes tecnologías de iluminación se evaluará durante 3 horas continuas en intervalos de 3 segundos, teniendo en cuenta que en el proceso de arranque tiene un periodo de 20 minutos donde el flujo luminoso se estabiliza. Se detalla que para pruebas en luminarias se evaluará el encendido y su estado estable [27], [28].

### **4.2.1 Medición de armónicos**

En este apartado se aborda la metodología, enfocada en la experimentación mediante la medición de armónicos de distintas tecnologías de iluminación. Para ello, y con colaboración de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi (ELEPCO S.A.), se nos ha asignado un total de siete luminarias: cuatro de tecnología de sodio y tres de tecnología led, cada una con diferente potencia.

Las mediciones se realizaron con el equipo de calidad de energía 435 series II, facilitado por la Universidad Técnica de Cotopaxi. El procedimiento experimental se llevó a cabo en dos ubicaciones distintas y constó de tres mediciones: Primera medición se efectuó en una instalación residencial durante un día hábil para evaluar la distorsión armónica en una conexión monofásica bifilar en condiciones de alta carga en la red eléctrica. Segunda medición se realizó durante un fin de semana, cuando la demanda de carga en la red disminuye, con el objetivo de comparar la variabilidad de los armónicos en condiciones de baja cargabilidad. Tercera

medición se llevó a cabo en el laboratorio de la Universidad, bajo una configuración de conexión trifásica, permitiendo analizar el impacto del cambio de topología en la generación de armónicos.

Las mediciones se realizaron durante un periodo de 3 horas con un intervalo de muestra de 3 segundo. En el caso de la residencia, se evaluó cada luminaria de forma individual. Para las pruebas en el laboratorio de la universidad, se midieron tres luminarias, considerando ambas tecnologías y sus diferentes potencias, en total se obtuvieron 16 mediciones.

Cada medición registro parámetros eléctricos clave, incluyendo voltaje, corrientes, potencias, distorsión armónica individual y distorsión armónica total, cuyos valores se presentarán en las siguientes tablas.

#### **4.2.2 Obtención de datos**

Para realizar el análisis de la distorsión armónica total (THD) e individual de cada luminaria, se realizaron previamente las mediciones con un analizador de calidad de energía. Se obtienen los archivos en formato de texto desde la aplicación Power Log 430 II, que registra los parámetros eléctricos medidos. Los datos extraídos se convierten a forma tabular para facilitar su procesamiento ya análisis. Se calculan los valores promedios de THD de voltaje y corriente en intervalos de 1 minuto para visualizar sus variaciones y obtener tendencias representativas. Se generan graficas a THD de voltaje y corriente a lo largo del tiempo para evaluar la estabilidad y comportamiento de la distorsión armónica.

Se elabora un diagrama de barras que muestran la contribución porcentual de cada componente armónica, lo que permite identificar las frecuencias más críticas y su impacto en la red eléctrica.

Este proceso permite una evaluación precisa del impacto de las luminarias en la calidad de energía, facilitando la identificación de posibles problemas.

#### **4.2.3 Tabulación de Datos**

A continuación, se realizará un análisis individual de cada luminaria, para observar su distorsión armónica total y sus armónicos según su nivel. En este apartado también se realizará un análisis corto de los armónicos individuales se basará en la resolución ARCENNR 003-23, donde menciona;

Los límites máximos del factor de distorsión armónica individual de voltaje y del factor de distorsión armónica total de voltaje son los siguientes, Tabla 18 [29]:

Tabla 18. Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [29].

Nivel de Voltaje	Factor de Distorsión armónica individual (%)	THD (%)
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

Los límites de distorsión armónica individual de corriente y distorsión de demanda total son los siguientes, Tabla 19:

Tabla 19. Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [29].

Nivel máximo de armónicos <i>impares</i> <sup>a</sup>						
(% de la corriente máxima de demanda)						
$I_{cc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$<20^b$	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

(a) Los límites para armónicos pares corresponden al 25% de los límites indicados en la Tabla 19.

(b) Todos los equipos están limitados a estos valores de distorsión de corriente, donde:  $I_{cc}$ = corriente máxima de corto circuito en el PCC<sup>2</sup> y,  $I_L$ = corriente máxima de carga a frecuencia fundamental (60 Hz).

#### 4.2.4 Simulación de armónicos en la red

Para la simulación en DigSilent PowerFactory, se realizó la reducción del modelo eléctrico de la subestación San Rafael como se muestra en la Figura 4 es la red original, previamente implementado en el mismo software. El sistema original fue proporcionado por el tutor de la investigación, se simplifico eliminando los ramales monofásicos como se muestra en la Figura 5, conservando únicamente los principales elementos de la red para optimizar el tiempo de cómputo y la estabilidad numérica de la simulación.

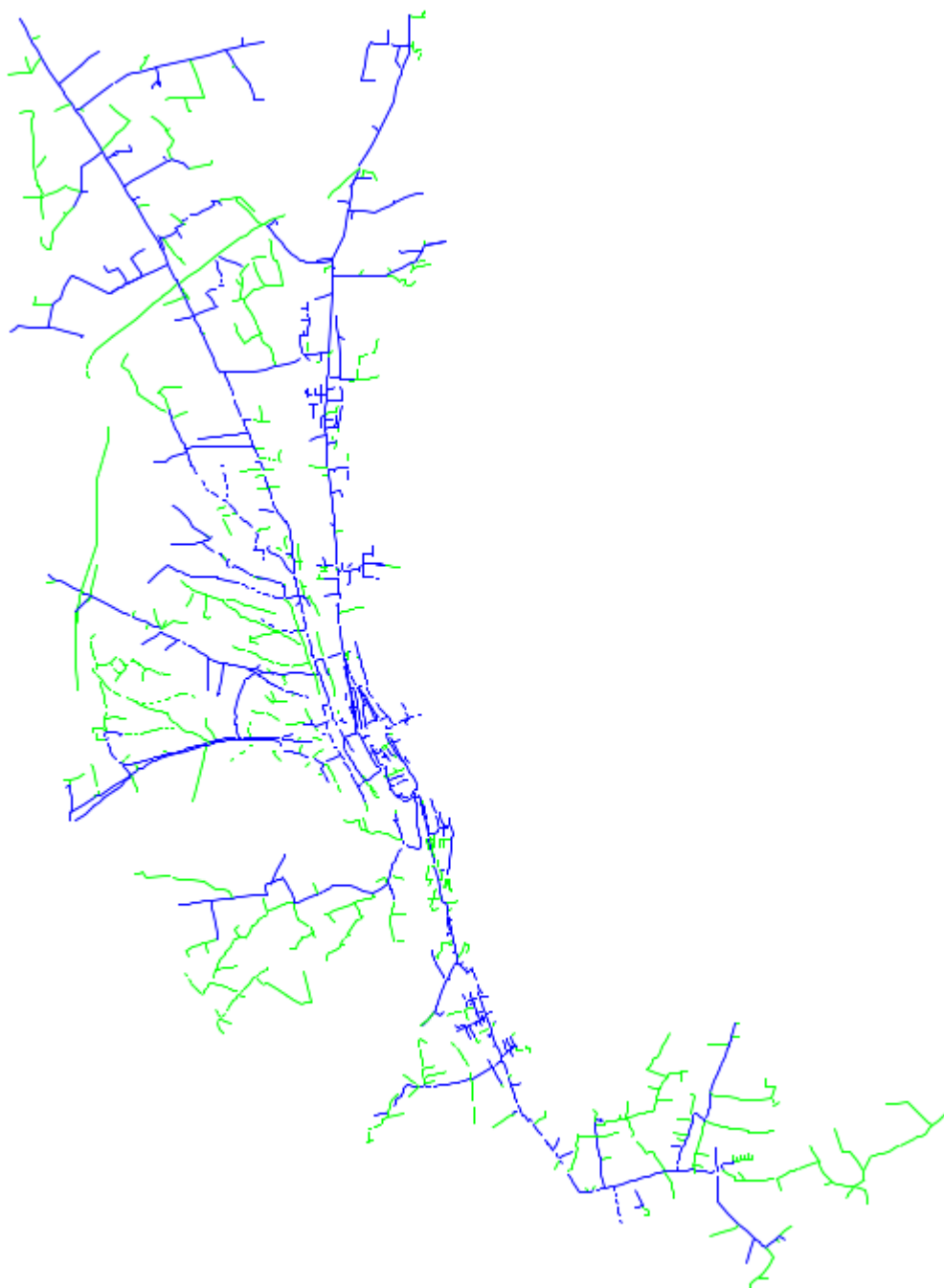


Figura 4. Red original de la subestación San Rafael.



Figura 5. Red reducida de la subestación San Rafael.

Para simular la presencia de armónicos en la red de la subestación san Rafael y analizar sus efectos, se realizará promedios con el fin de ingresar los datos de los armónicos individuales de cada luminaria con el tipo de fuente armónica de IEC 61000 disponible en el software, también se realiza los promedios sabiendo en Cotopaxi tenemos alrededor de 63454 luminarias de diferentes tecnologías.

En la Tabla 20 se presentan en porcentaje las luminarias en la subestación analizada. Se observa que dicha subestación abastece de energía a un total de 10105 luminarias. A partir de esta información, se calculó el porcentaje de luminarias según su tecnología.

Tabla 20. Cantidad de luminarias Subestación San Rafael

SUBESTACION SAN RAFAEL		
	CANTIDAD	PORCENTAJE
TOTAL	10105	100%
LED	1097	11%
SODIO	8547	85%
OTRAS	461	4%

En la Figura 6 se puede observar de mejor manera el porcentaje de cada tecnología de iluminación utilizada en el alimentador de la Subestación San Rafael.

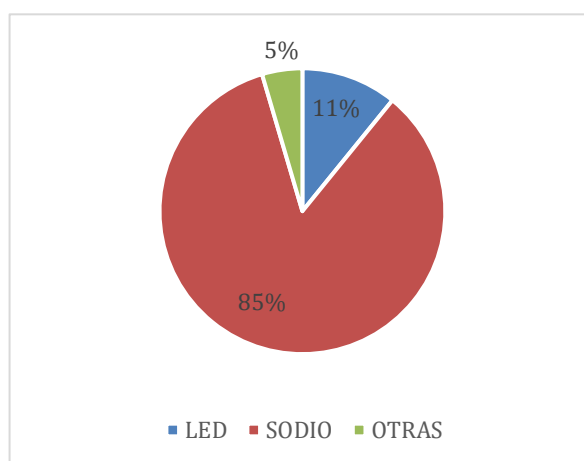


Figura 6. Tecnologías de luminarias en el sistema

Posteriormente, con el apoyo del Geoportal de ELEPCO S.A., se determinaron los valores promedio de luminarias por transformador, considerando diferentes niveles de potencia, lo que permitió obtener la Tabla 21.

Tabla 21. Número de luminarias por capacidad de transformador.

CAPACIDAD (KVA)	LUMINARIAS (#)
100	13
30	11
45	23
50	18
75	29

Una vez realizados los cálculos para aproximar a un escenario actual del sistema eléctrico, en la investigación se evaluará tres casos.

El primer caso, se considera la situación actual de la red, tomando en cuenta las tecnologías de iluminación utilizadas en el alumbrado público. Este análisis inicial permitirá establecer una línea base de armónicos presentes y su impacto en la calidad de energía. El segundo caso, se cambiará parcialmente la tecnología de iluminación, sustituyendo la tecnología que genera

mayores armónicos por alternativas más eficientes y con menor impacto en la red. Este cambio busca reducir parcialmente los niveles de distorsión armónica, mejorando los índices de calidad de energía. El tercer caso, es el reemplazo total de las tecnologías de iluminación con el fin de minimizar significativamente la distorsión armónica en la red eléctrica. Este escenario pretende demostrar cuan eficiente es en términos de calidad de energía y cargabilidad.

Adicional se simulará un sistema con un transformador trifásico y un monofásico Figura 7, ambos con una potencia similar, en cada barra o poste del sistema se instalará diferentes tipos de tecnología de luminarias, lo que permite evaluar y comparar la distorsión armónica en la red.

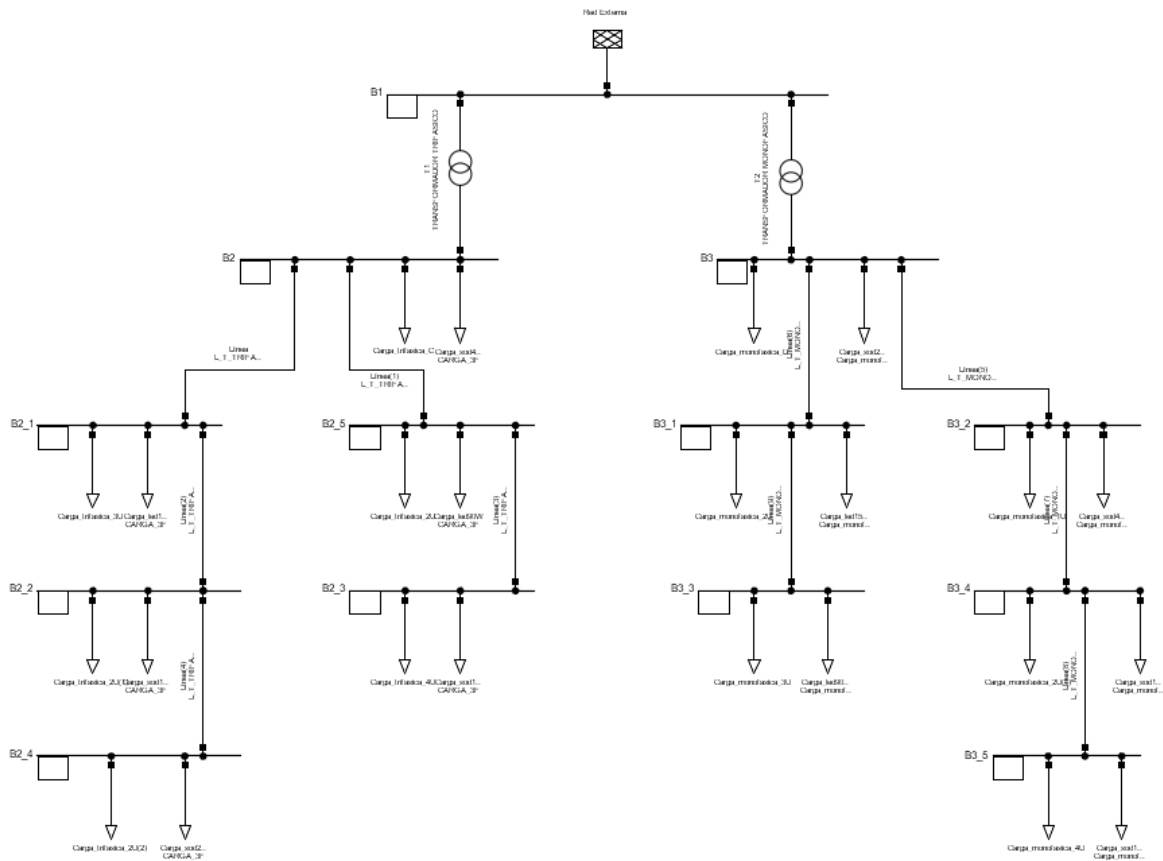


Figura 7. Sistema desbalanceado.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los datos extraídos y procesados de los armónicos de cada luminaria individualmente y la simulación de diferentes casos.

### 5.1 ARMÓNICOS PRODUCIDO POR TIPO DE LUMINARIA

#### 5.1.1 Medición 1- Luminaria 1 de 400 W

Se presenta la distorsión armónica total de la luminaria de 400 W de sodio de alta presión.

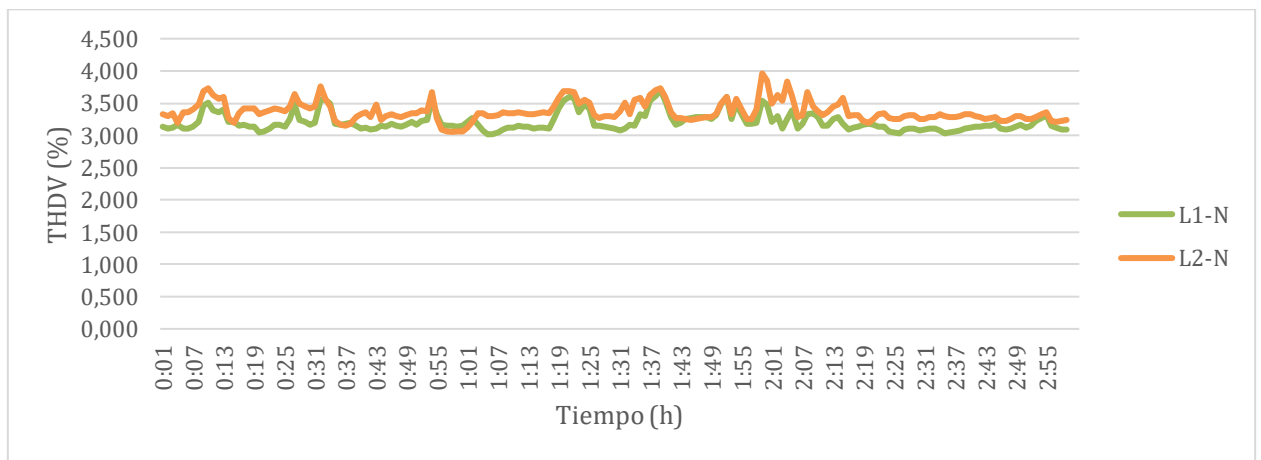


Figura 8. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 400W.

En la Figura 8, se observa una ligera distorsión en ambas líneas, con valores que oscilan entre el 3% y el 4% de distorsión armónica total.

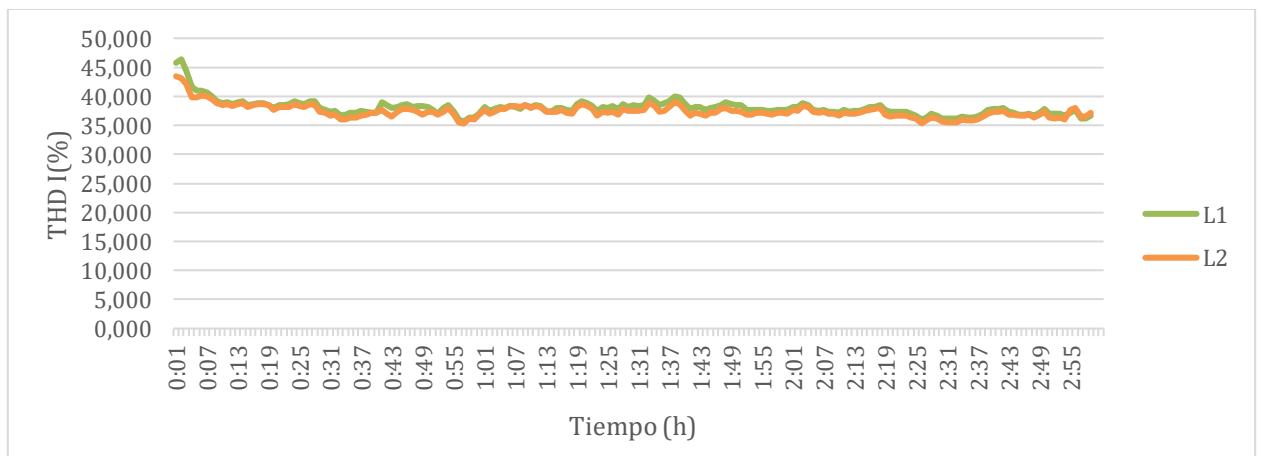


Figura 9. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 400W.

En la Figura 9, se presenta la máxima distorsión armónica de corriente, observándose que oscila entre un 35% y un 40%.

Dado que los valores observados superan el límite de distorsión armónica de corriente en un 30%, se está produciendo un incumplimiento de la regulación de acuerdo a la Tabla 19. A continuación, se analizarán los armónicos de corriente de manera individual.

En la Tabla 22 se resumen los armónicos individuales de voltaje y corriente.

Tabla 22. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 400W.

ORDEN ARMONICO	SODIO 400 W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
0	0,079	0,124	0,000	0,000
1	100,000	100,000	100,000	100,000
2	0,048	0,050	1,175	0,655
3	2,035	2,386	15,701	15,919
4	0,026	0,027	0,559	0,456
5	2,210	2,029	19,540	18,726
6	0,022	0,021	0,322	0,307
7	0,252	0,250	3,409	3,479
8	0,015	0,015	0,243	0,260
9	0,632	0,748	12,861	12,582
10	0,011	0,012	0,218	0,234
11	0,595	0,527	12,126	11,993
12	0,011	0,013	0,271	0,266
13	0,460	0,568	13,326	13,067
14	0,010	0,011	0,266	0,250
15	0,316	0,343	9,928	9,742

Para la luminaria 1, solo se analizarán los armónicos individuales de corriente, dado que su distorsión armónica total (THD) supera los límites establecidos.

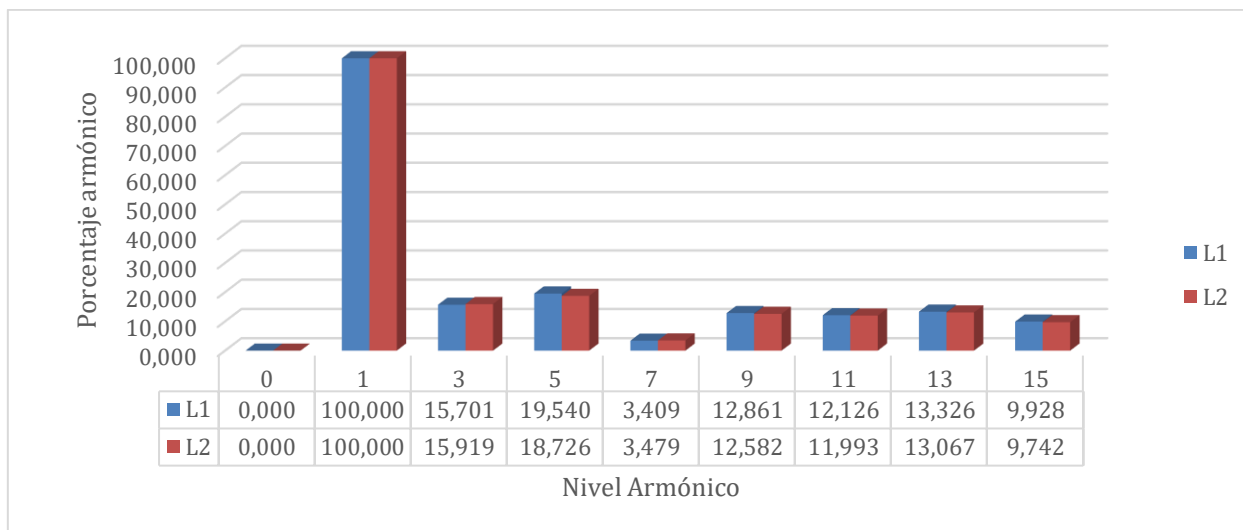


Figura 10. Armónicos individuales de corriente luminaria de 400W.

Se graficaron los armónicos impares de corriente, considerando que los armónicos pares y los de voltaje no superan los límites establecidos por la regulación, por lo que se consideran despreciables. En la Figura 10, se observa que el séptimo armónico está dentro de los niveles permitidos, mientras que el resto de los armónicos impares superan los límites establecidos como se muestra en la Tabla 19.

Cabe destacar que la mayor presencia de armónicos se encuentra en el tercer y quinto armónico, con valores que oscilan entre el 15% y el 20% en ambas líneas. Además, los armónicos del noveno al decimoquinto presentan valores entre el 9% y el 14%, superando los límites permitidos.

### 5.1.2 Medición 2 - Luminaria 2 de 250 W

Se presenta la distorsión armónica total de luminaria de 250 W de sodio de alta presión.

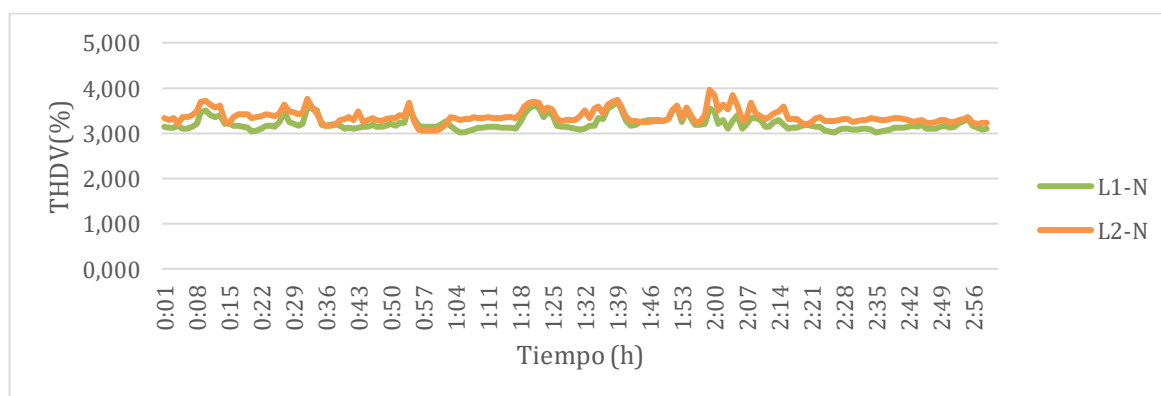


Figura 11. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 250W.

En la Figura 11, se observa una ligera distorsión en ambas líneas, con valores que oscilan entre el 3% y el 4% de distorsión armónica total de corriente. Esto indica que se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa ARCENNR 003-23, que permite una distorsión armónica máxima del 8%.

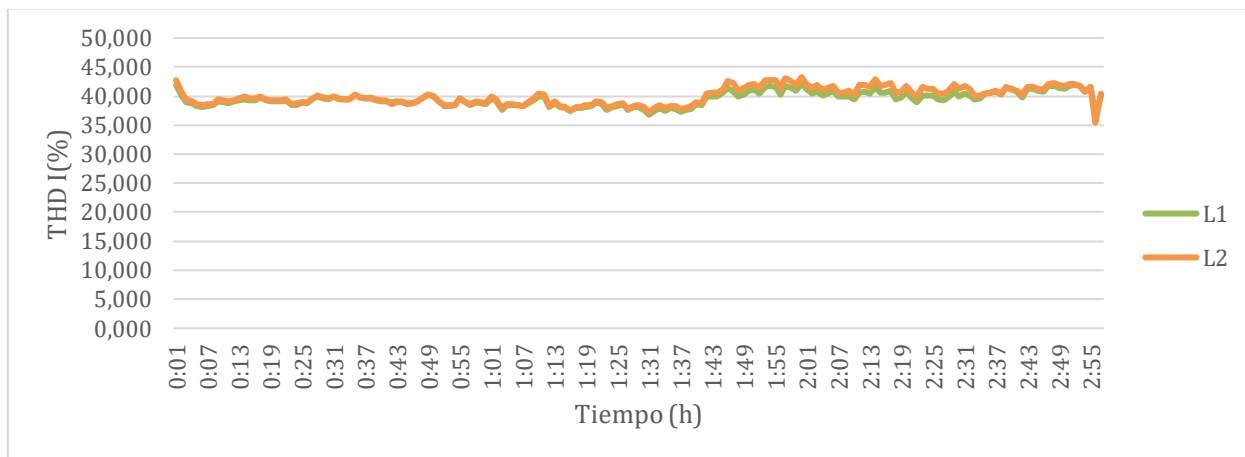


Figura 12. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 250W.

En la Figura 12, se presenta la máxima distorsión armónica de corriente, observándose una variación entre el 35% y el 45%.

Este resultado refleja un incumplimiento de la normativa como se muestra en la Tabla 19, ya que los valores observados superan el límite en un 30%. Por lo tanto, se procederá a analizar los armónicos de corriente de manera individual.

En la Tabla 23 y Tabla 24, se resumen los armónicos individuales de voltaje y corriente.

Tabla 23. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 250W, parte A.

ORDEN ARMONICO	SODIO 250W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
0	0,056	0,111	0,000	0,000
1	100,000	100,000	100,000	100,000
2	0,060	0,059	1,567	0,898
3	2,114	2,251	14,935	15,466
4	0,031	0,032	0,763	0,757
5	2,064	2,123	20,372	20,645

Tabla 24. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 250W, parte B.

ORDEN ARMONICO	SODIO 250W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
6	0,027	0,027	0,470	0,424
7	0,322	0,240	4,905	4,914
8	0,018	0,018	0,364	0,351
9	0,683	0,686	14,456	14,355
10	0,016	0,013	0,285	0,306
11	0,574	0,477	13,702	13,806
12	0,013	0,014	0,367	0,356
13	0,498	0,534	14,779	14,910
14	0,011	0,011	0,341	0,323
15	0,320	0,328	4,813	10,752

Para la luminaria 2, solo se analizarán los armónicos individuales de corriente, dado que su distorsión armónica total (THD) supera los límites establecidos.

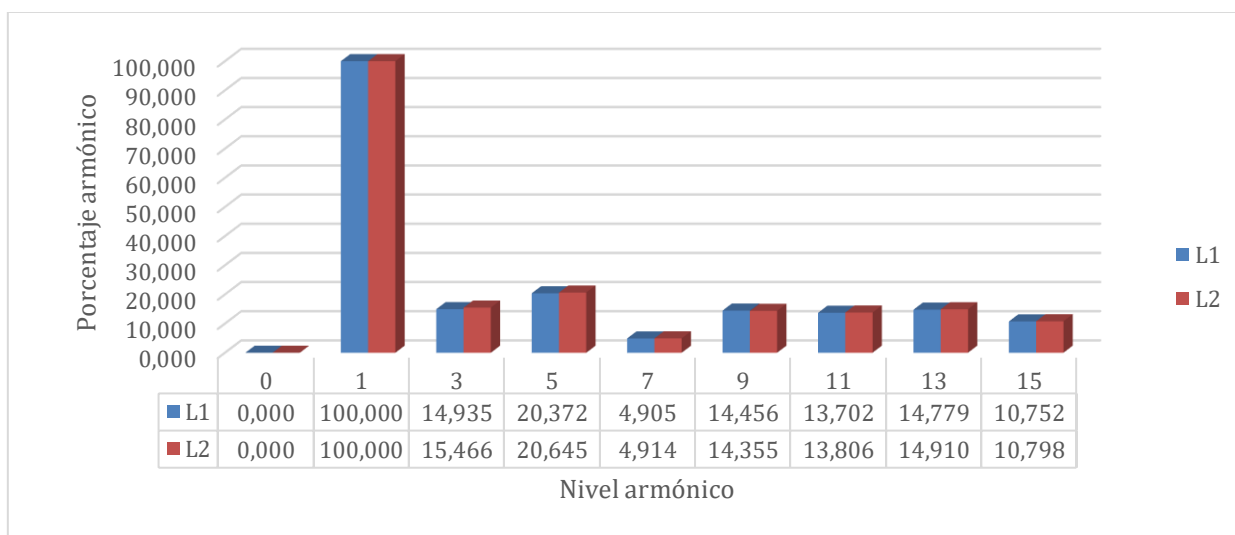


Figura 13. Armónicos individuales de corriente luminaria de 250W.

Se graficaron los armónicos impares de corriente, considerando que los armónicos pares y los de voltaje no superan los límites establecidos por la regulación, por lo que se consideran despreciables. En la Figura 13, se observa que el séptimo armónico está dentro de los niveles

permitidos, mientras que el resto de los armónicos impares superan los límites establecidos. Según la normativa ARCENNR 003-23 de la Tabla 19.

Cabe señalar que la mayor presencia de armónicos se encuentra en el tercer y quinto armónico, con valores que oscilan entre el 15% y el 20% en ambas líneas. Además, los armónicos del noveno al decimoquinto presentan valores entre el 9% y el 14%, superando los límites establecidos.

### 5.1.3 Medición 3 - Luminaria 3 de 150 W

Se presenta la distorsión armónica total de luminaria de 150 W de sodio de alta presión.

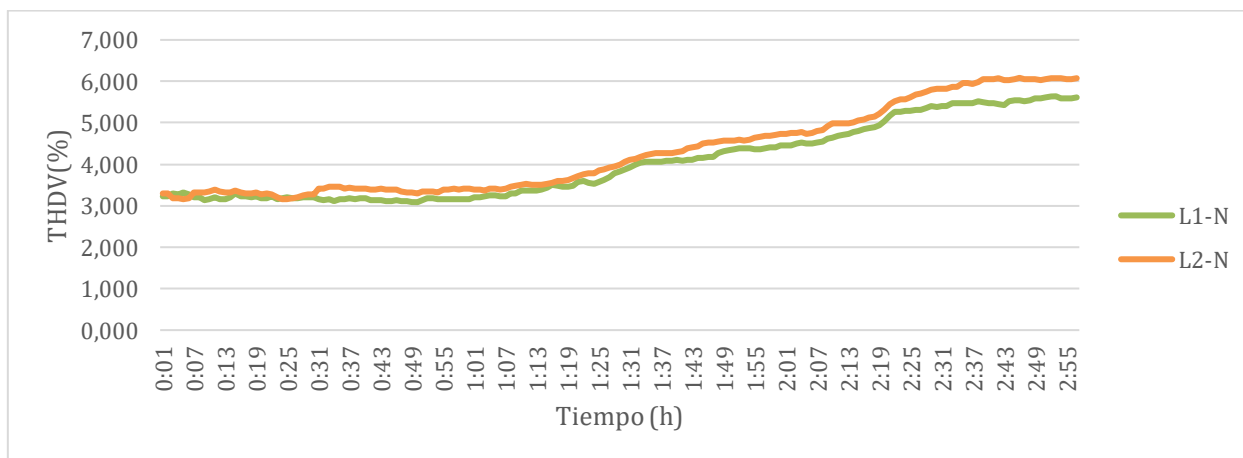


Figura 14. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 150W.

En la Figura 14, se observa una ligera distorsión en ambas líneas, con valores que oscilan entre el 3% y el 6% de distorsión armónica total. Esto indica que se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa ARCENNR 003-23, que permite una distorsión armónica máxima del 8%.

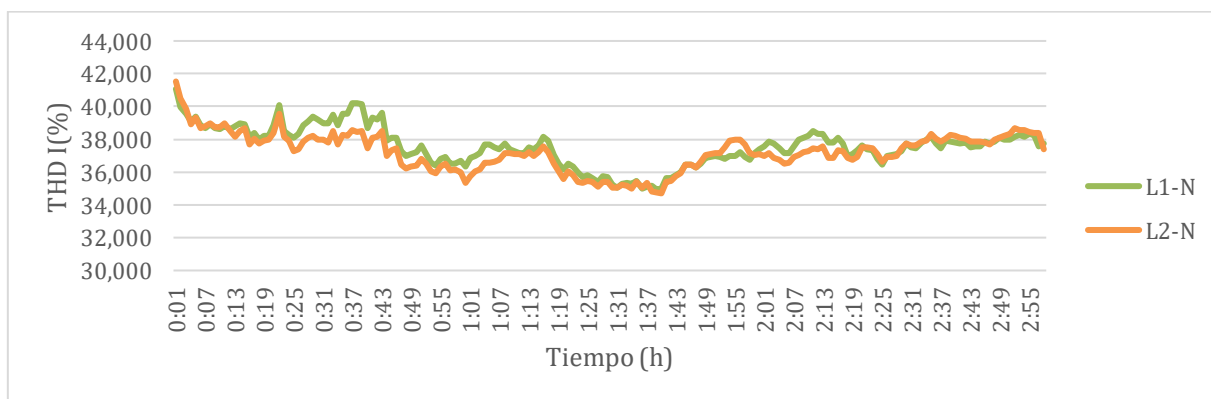


Figura 15. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 150W.

En la Figura 15 se muestra la máxima distorsión armónica de corriente, la cual presenta valores que oscilan entre el 34% y el 42%.

Con base en los resultados obtenidos, se evidencia un incumplimiento de la normativa, ya que los valores registrados superan en un 30% el límite permitido correspondiente. Esto subraya la necesidad de analizar de forma detallada los armónicos de corriente individuales.

En la Tabla 25 se resumen los armónicos individuales de voltaje y corriente.

Tabla 25. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W.

ORDEN ARMONICO	SODIO 150W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
0	0,094	0,129	0,000	0,000
1	100,000	100,000	100,000	100,000
2	0,048	0,047	2,891	1,331
3	3,432	3,597	21,603	21,613
4	0,027	0,027	1,357	0,975
5	1,456	1,770	13,302	13,385
6	0,021	0,020	0,671	0,577
7	0,312	0,251	5,757	5,741
8	0,015	0,014	0,423	0,376
9	0,872	0,900	17,448	17,001
10	0,011	0,011	0,310	0,330
11	0,372	0,275	9,176	9,216
12	0,009	0,009	0,294	0,287
13	0,329	0,364	9,240	9,187
14	0,008	0,008	0,269	0,259
15	0,246	0,291	8,266	8,261

En el caso de la luminaria 3, se realizará únicamente el análisis de los armónicos individuales de corriente, ya que su distorsión armónica total (THD) excede los límites establecidos según la normativa aplicable.

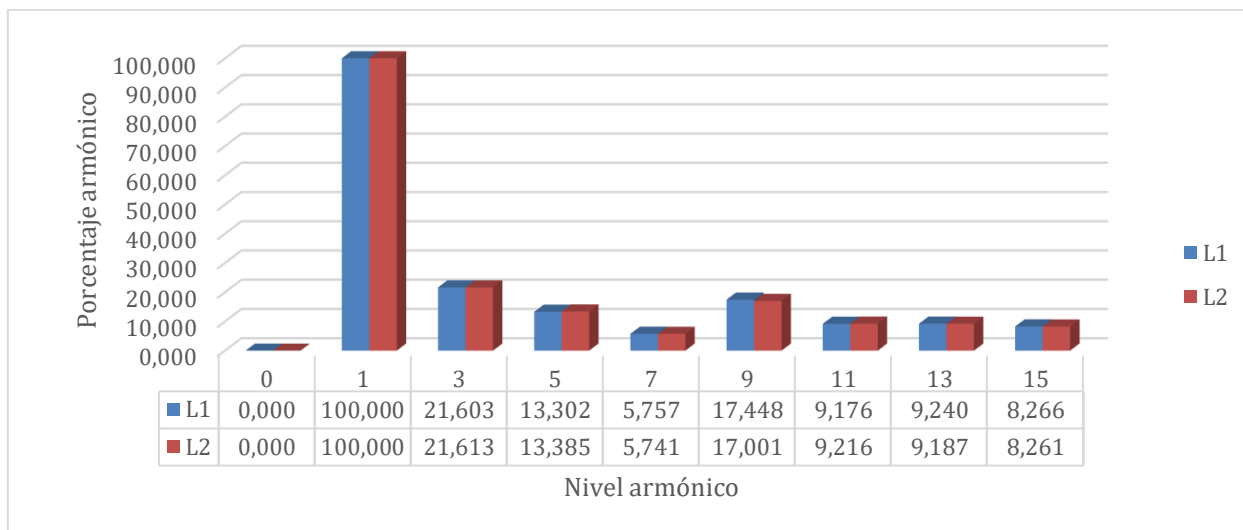


Figura 16. Armónicos individuales de corriente luminaria de 150W.

Se graficaron los armónicos impares de corriente, ya que los armónicos pares y los de voltaje no superan los límites establecidos por la normativa y se consideran despreciables. En la Figura 16, se observa que los armónicos impares exceden los valores máximos permitidos según la normativa ARCENNR 003-23.

Los valores más elevados se concentran en el tercer y noveno armónico, con rangos entre el 15% y el 25% en ambas líneas. Además, los armónicos del quinto, séptimo, onceavo, treceavo y decimoquinto presentan niveles entre el 5% y el 14%, lo que también supera los límites permitidos.

#### 5.1.4 Medición 4 - Luminaria 4 de 100 W

Se presenta la distorsión armónica total de luminaria de 100 W de sodio de alta presión.

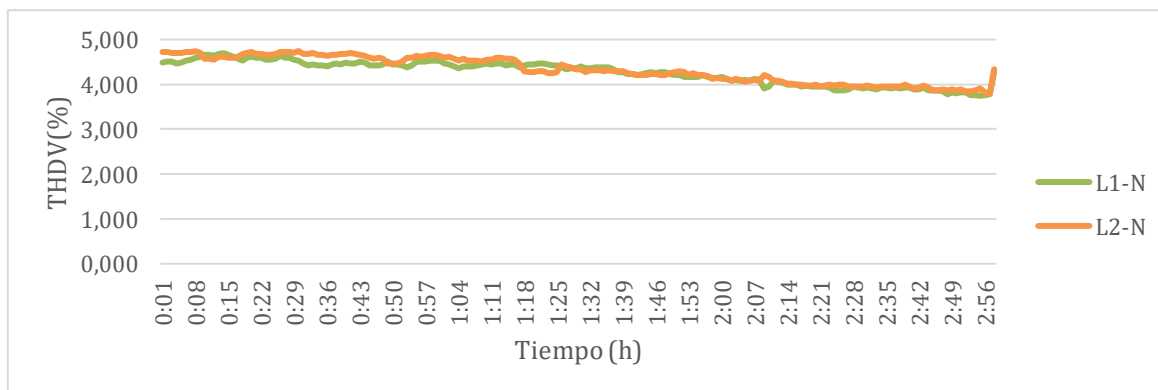


Figura 17. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 100W.

En la Figura 17 se observa una ligera distorsión en ambas líneas, con valores que oscilan entre el 3,5% y el 5% de distorsión armónica total. Esto indica que se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa ARCENNR 003-23, que permite una distorsión armónica máxima del 8%.

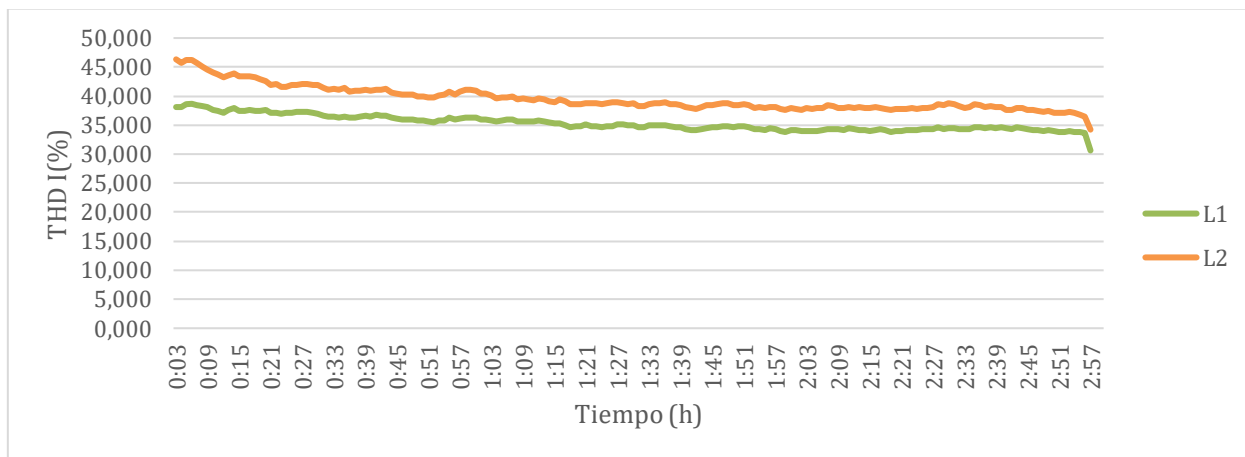


Figura 18. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 100W.

En la Figura 18 se muestra la máxima distorsión armónica de corriente, la cual presenta valores que oscilan entre el 35% y el 45%.

Con base en los resultados obtenidos, se evidencia un incumplimiento de la normativa, ya que los valores registrados superan en un 30% el límite permitido correspondiente. Esto subraya la necesidad de analizar de forma detallada los armónicos de corriente individuales.

En la Tabla 26 y Tabla 27 se resumen los armónicos individuales de voltaje y corriente.

Tabla 26. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 100W, parte A.

ORDEN ARMONICO	SODIO 100W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
0	0,123	0,144	0,000	0,000
1	100,000	100,000	100,000	100,000
2	0,047	0,046	4,851	2,600
3	3,616	3,705	24,049	26,119
4	0,027	0,025	1,942	1,277
5	1,819	1,727	15,056	17,938

Tabla 27. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 100W, parte B.

ORDEN ARMONICO	SODIO 100W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
6	0,022	0,022	0,937	0,957
7	0,221	0,137	3,672	4,152
8	0,015	0,014	0,534	0,598
9	0,686	0,777	13,223	15,611
10	0,010	0,009	0,364	0,447
11	0,335	0,483	7,952	8,217
12	0,008	0,008	0,352	0,436
13	0,207	0,225	5,419	5,972
14	0,009	0,007	0,277	0,310
15	0,157	0,213	5,280	5,955

En el caso de la luminaria 4, se realizará únicamente el análisis de los armónicos individuales de corriente, ya que su distorsión armónica total (THD) excede los límites establecidos según la normativa aplicable.

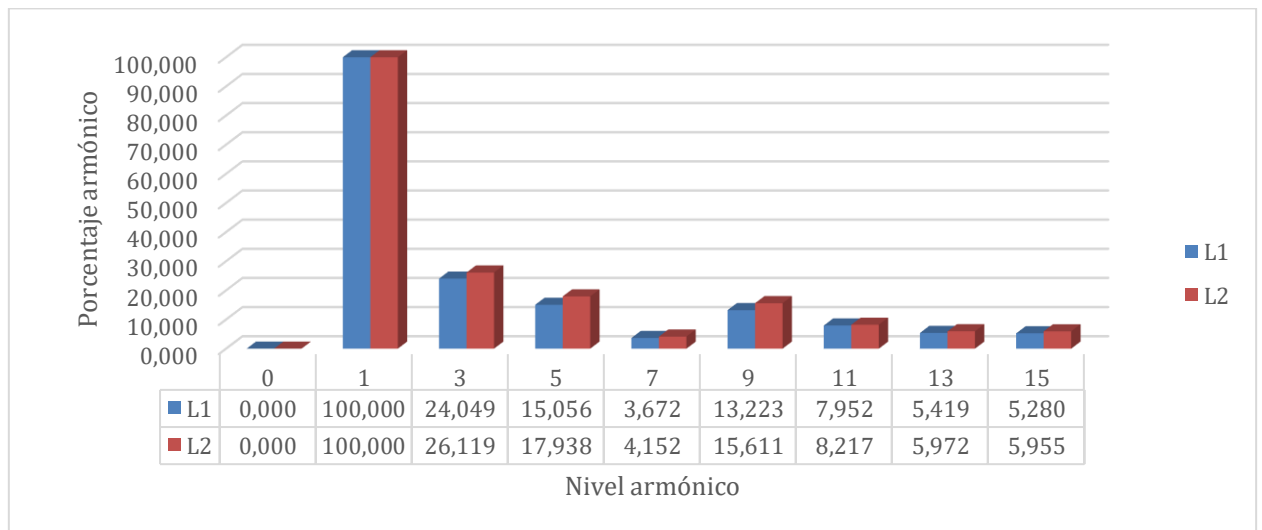


Figura 19. Armónicos individuales de corriente luminaria de 100W.

Se graficaron los armónicos impares de corriente, ya que los armónicos pares y los de voltaje no superan los límites establecidos por la normativa y se consideran despreciables. En la Figura

19, se observa que los armónicos impares exceden los valores máximos permitidos según la normativa ARCENNR 003-23.

Los valores más elevados se concentran en el tercer y quinto armónico, con rangos entre el 15% y el 26% en ambas líneas. Además, los armónicos del séptimo y decimoquinto presentan niveles entre el 5% y el 9%, lo que también supera los límites permitidos.

### 5.1.5 Medición 5 - Luminaria 5 de 90 W

Se presenta la distorsión armónica total de luminaria de 90 W Led.

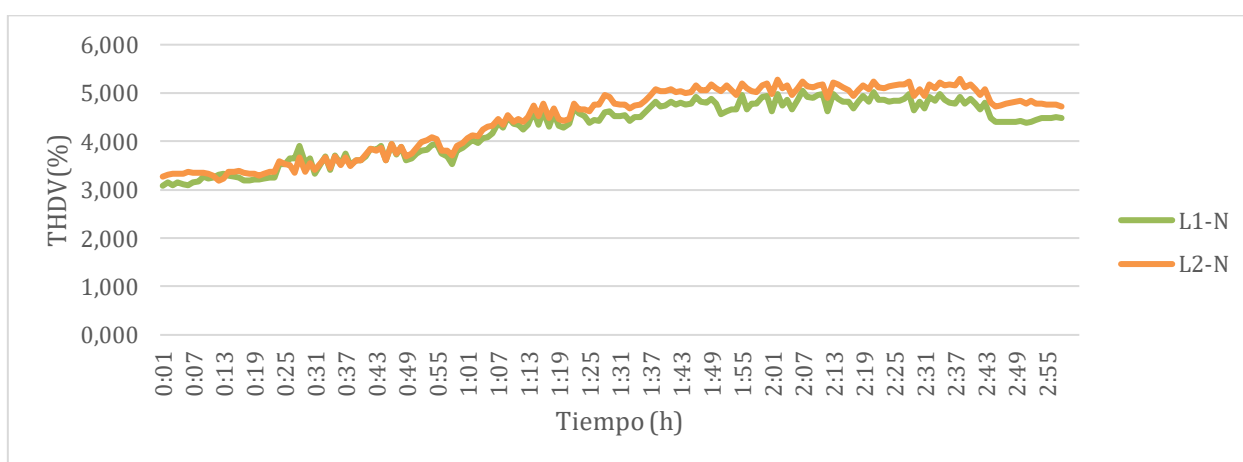


Figura 20. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 90W.

En la Figura 20 se observa una ligera distorsión en ambas líneas, con valores que oscilan entre el 3% y el 5% de distorsión armónica total. Esto indica que se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa ARCENNR 003-23, que permite una distorsión armónica máxima del 8%.

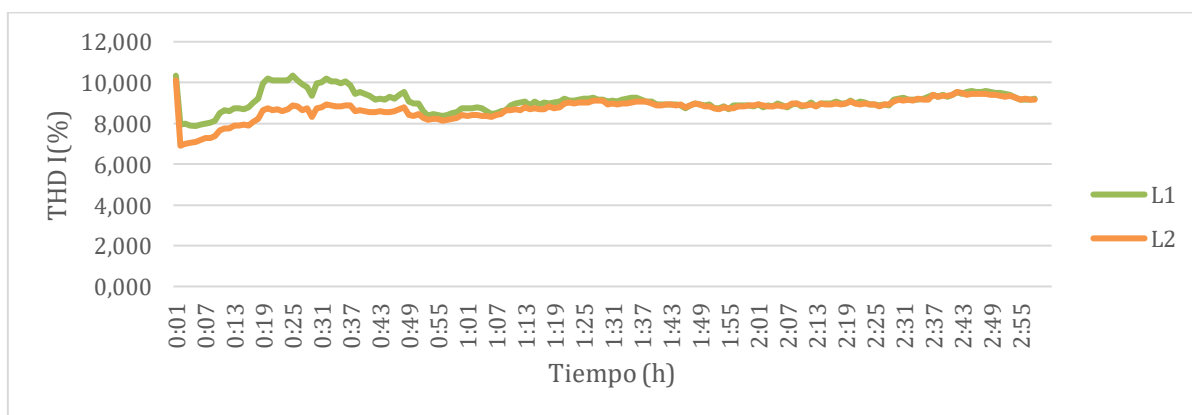


Figura 21. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 90W.

En la Figura 21 se muestra la máxima distorsión armónica de corriente, la cual presenta valores que oscilan entre el 6% y el 11%.

Con base en los resultados obtenidos, se evidencia un incumplimiento de la normativa, ya que los valores registrados superan en un 1% el límite permitido correspondiente lo cual es relativamente bajo a comparación de otra tecnología. Sin embargo, esto subraya la necesidad de analizar de forma detallada los armónicos de corriente individuales.

En la Tabla 28 se resumen los armónicos individuales de voltaje y corriente.

Tabla 28. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 90W.

ORDEN ARMONICO	LED 90 W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
0	0,072	0,115	0,000	0,000
1	100,000	100,000	100,000	100,000
2	0,052	0,051	4,691	2,749
3	2,219	2,427	2,690	2,720
4	0,029	0,030	2,294	0,936
5	2,401	2,253	4,322	4,370
6	0,028	0,028	0,952	0,640
7	0,201	0,215	1,743	1,986
8	0,022	0,018	0,486	0,435
9	0,542	0,552	1,665	1,993
10	0,012	0,011	0,344	0,348
11	0,401	0,356	1,372	0,728
12	0,011	0,012	0,329	0,291
13	0,364	0,374	1,070	1,058
14	0,011	0,009	0,275	0,249
15	0,238	0,220	1,573	1,574

En el caso de la luminaria 5, se realizará únicamente el análisis de los armónicos individuales de corriente, ya que su distorsión armónica total (THD) excede los límites establecidos según la normativa aplicable.

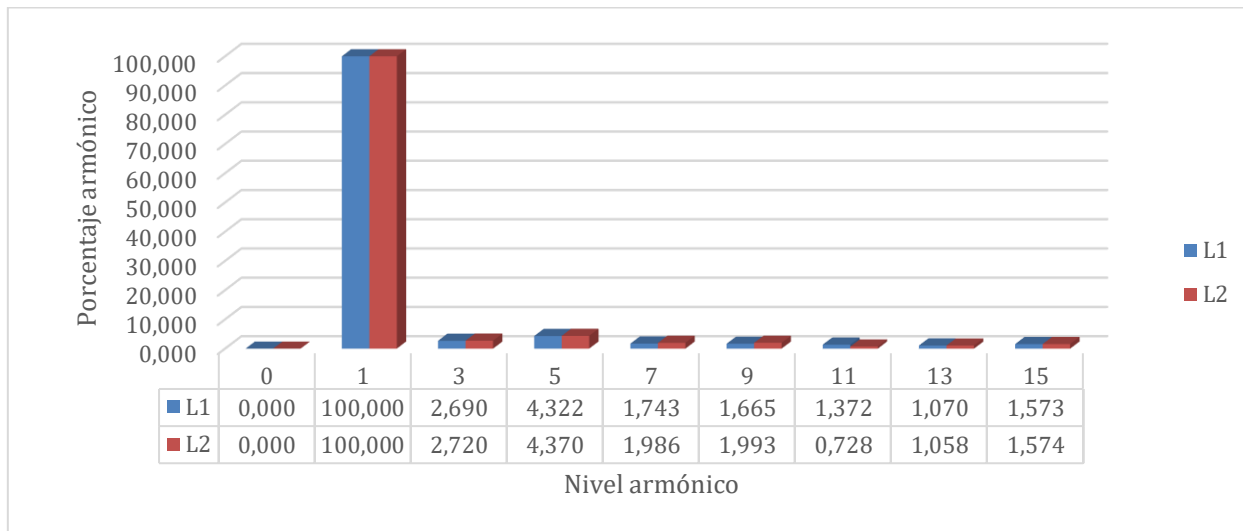


Figura 22. Armónicos individuales de corriente luminaria de 90W.

Se graficaron los armónicos impares de corriente, ya que los armónicos pares y los de voltaje no superan los límites establecidos por la normativa y se consideran despreciables. En la Figura 22, se observa que los armónicos impares exceden los valores máximos permitidos según la normativa ARCENNR 003-23. Los valores levemente elevados se concentran en el quinto armónico, con rangos entre el 4% y 4,5% en ambas líneas.

### 5.1.6 Medición 6 - Luminaria 6 de 150 W.

Se presenta la distorsión armónica total de luminaria de 150 W Led.

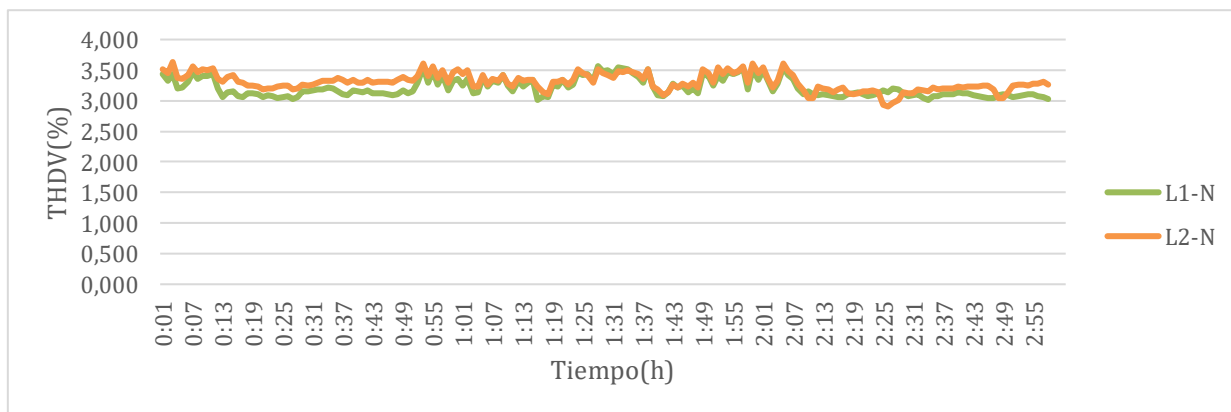


Figura 23. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 150W- vía pública.

En la Figura 23 se observa una ligera distorsión en ambas líneas, con valores que oscilan entre el 3% y el 4% de distorsión armónica total. Esto indica que se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa ARCENNR 003-23, que permite una distorsión armónica máxima del 8%

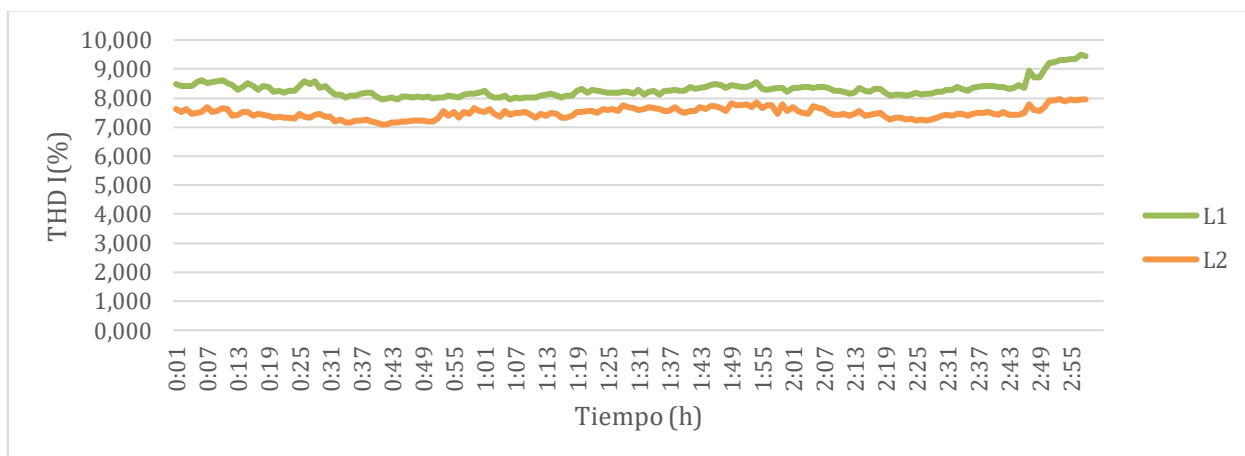


Figura 24. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 150W - vía pública.

En la Figura 24 se muestra la máxima distorsión armónica de corriente, la cual presenta valores que oscilan entre el 6% y el 11%.

Con base en los resultados obtenidos, se evidencia un incumplimiento de la normativa, ya que los valores registrados superan en un 1% el límite permitido correspondiente lo cual es relativamente bajo a comparación de otra tecnología. Sin embargo, esto subraya la necesidad de analizar de forma detallada los armónicos de corriente individuales.

En la Tabla 29 y Tabla 30 se resumen los armónicos individuales de voltaje y corriente.

Tabla 29. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W, parte A.

ORDEN ARMONICO	LED 150 W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
0	0,069	0,113	0,000	0,000
1	100,000	100,000	100,000	100,000
2	0,049	0,047	4,213	2,825
3	2,039	2,260	2,307	1,662
4	0,026	0,027	2,513	1,098

Tabla 30. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W, parte B.

ORDEN ARMONICO	LED 150 W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
5	2,318	2,228	3,884	4,156
6	0,026	0,026	1,057	0,765
7	0,195	0,203	1,970	2,263
8	0,020	0,017	0,548	0,520
9	0,560	0,584	1,816	2,223
10	0,012	0,011	0,403	0,408
11	0,399	0,380	1,503	0,864
12	0,011	0,012	0,396	0,341
13	0,356	0,382	0,952	0,956
14	0,011	0,010	0,324	0,290
15	0,247	0,249	1,840	1,843

En el caso de la luminaria 6, se realizará únicamente el análisis de los armónicos individuales de corriente, ya que su distorsión armónica total (THD) excede los límites establecidos según la normativa aplicable.

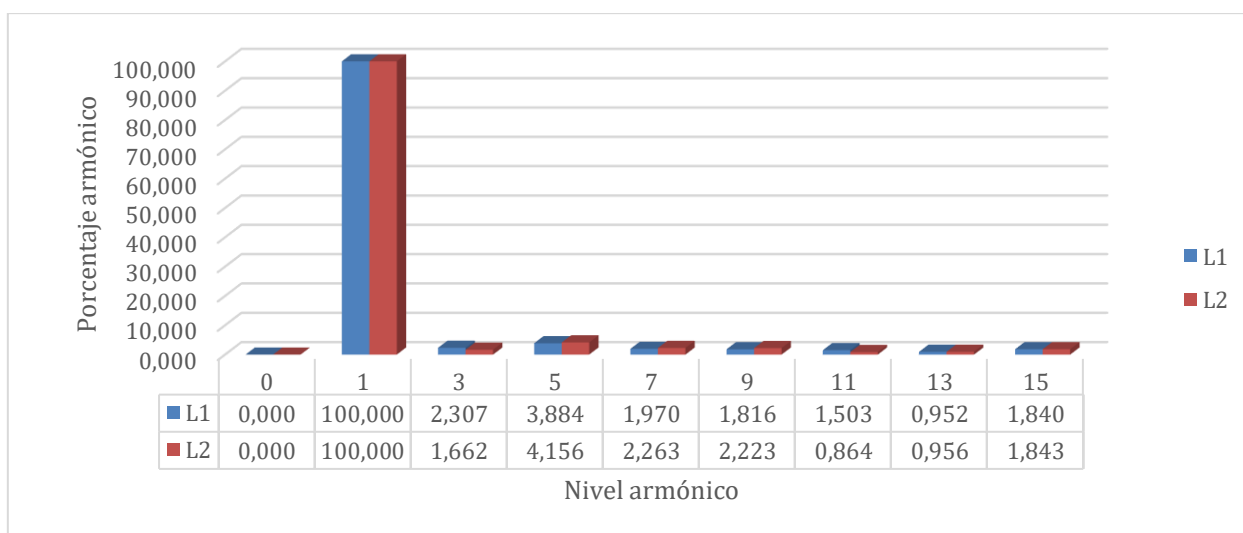


Figura 25. Armónicos individuales de corriente luminaria de 150W - vía pública.

Se graficaron los armónicos impares de corriente, ya que los armónicos pares y los de voltaje no superan los límites establecidos por la normativa y se consideran despreciables. En la Figura 25, se observa que los armónicos impares exceden los valores máximos permitidos según la normativa ARCENNR 003-23. Los valores más elevados se concentran en el quinto armónico, con rangos entre el 4% y 4,5% en la línea 2.

### 5.1.7 Medición 7 - Luminaria 7 de 150 W.

Se presenta la distorsión armónica total de luminaria de 150 W Led.

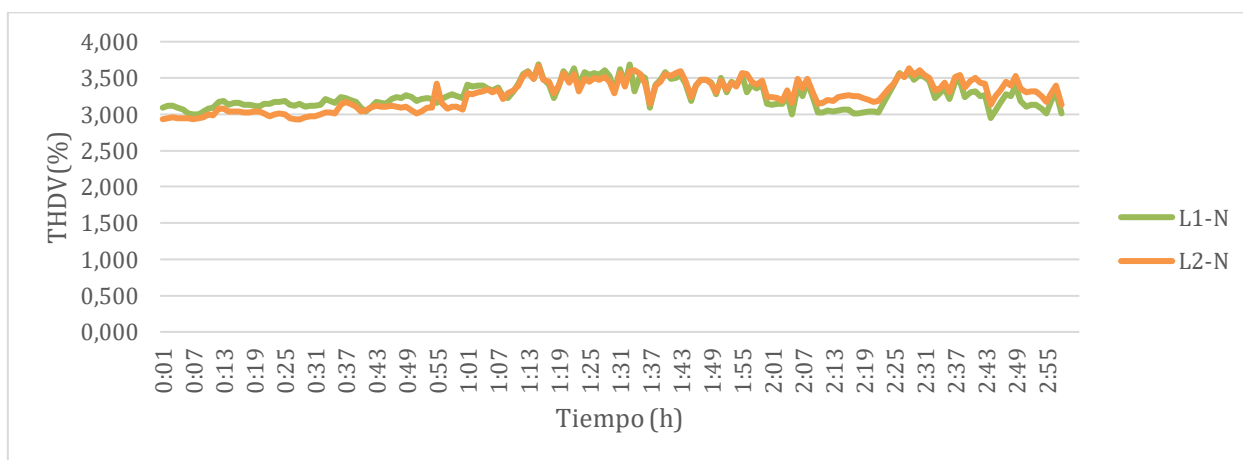


Figura 26. Distorsión armónica total de voltaje luminaria de 150W – espacios recreativos.

En la Figura 26 se observa una ligera distorsión en ambas líneas, con valores que oscilan entre el 3% y el 4% de distorsión armónica total. Esto indica que se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa ARCENNR 003-23, que permite una distorsión armónica máxima del 8%

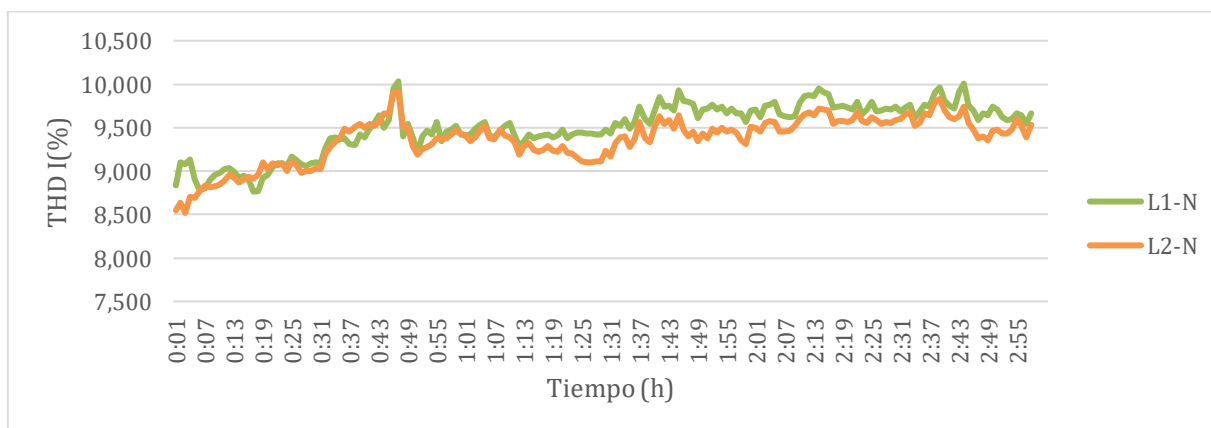


Figura 27. Distorsión armónica total de corriente luminaria de 150W – espacios recreativos.

En la Figura 27 se muestra la máxima distorsión armónica de corriente, la cual presenta valores que oscilan entre el 8,5% y el 10%.

Con base en los resultados obtenidos, se evidencia un incumplimiento de la normativa, ya que los valores registrados superan en un 5% el límite permitido correspondiente lo cual es relativamente bajo a comparación de otra tecnología. Sin embargo, esto subraya la necesidad de analizar de forma detallada los armónicos de corriente individuales.

En la Tabla 31 se resumen los armónicos individuales de voltaje y corriente.

Tabla 31. Armónicos individuales de voltaje y corriente luminaria de 150W.

ORDEN ARMONICO	LED P 150 W			
	ARMONICOS VOLTAJE		ARMONICOS CORRIENTE	
	L1-N	L2-N	L1	L2
0	0,096	0,130	0,000	0,000
1	100,000	100,000	100,000	100,000
2	0,058	0,055	3,144	2,282
3	2,221	2,273	4,254	4,603
4	0,031	0,030	1,644	0,778
5	2,183	2,125	5,895	6,055
6	0,029	0,029	0,808	0,492
7	0,320	0,254	3,190	3,226
8	0,022	0,020	0,444	0,365
9	0,553	0,614	2,895	3,103
10	0,012	0,012	0,293	0,294
11	0,459	0,412	0,992	0,894
12	0,011	0,012	0,257	0,246
13	0,289	0,359	0,697	0,689
14	0,010	0,010	0,221	0,211
15	0,240	0,284	0,818	0,854

En el Medición de la luminaria 7, se realizará únicamente el análisis de los armónicos individuales de corriente, ya que su distorsión armónica total (THD) excede los límites establecidos según la normativa aplicable.

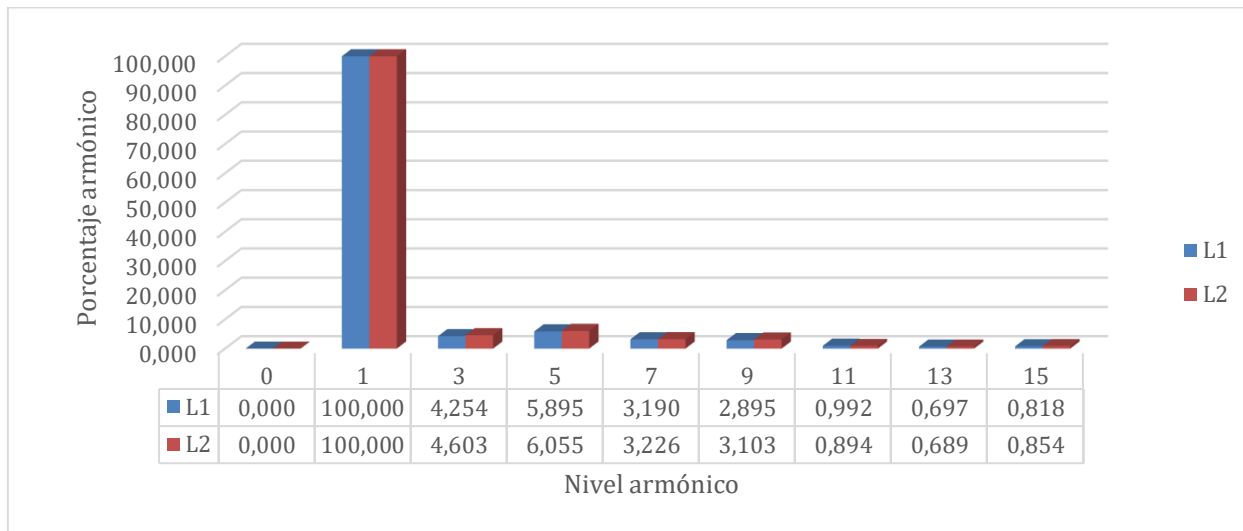


Figura 28. Armónicos individuales de corriente luminaria de 150W – espacios recreativos.

Se graficaron los armónicos impares de corriente, ya que los armónicos pares y los de voltaje no superan los límites establecidos por la normativa y se consideran despreciables. En la Figura 28, se observa que los armónicos impares exceden los valores máximos permitidos según la normativa ARCENNR 003-23. Los valores más elevados se concentran en el tercer y quinto armónico, con rangos entre el 4% y 6% en ambas líneas.

A continuación, se presenta la Tabla 32 donde se resume los resultados de las mediciones de la distorsión armónica de cada luminaria.

Tabla 32. Resumen de distorsión armónica total.

<b>Luminaria</b>	<b>Promedio THD V [%]</b>	<b>Promedio THD I [%]</b>	<b>Armónicos individuales Representativos [%]</b>
<b>Sodio 400 W</b>	L1: 3,211 L2: 3,371	L1: 38,023 L2: 37,444	L1- L2: 3 – 5 – 9 – 11 - 13
<b>Sodio 250 W</b>	L1: 3,200 L2: 3,315	L1: 39,654 L2: 40,028	L1- L2: 3 – 5 – 9 – 11 - 13
<b>Sodio 150 W</b>	L1: 4,029 L2: 4,271	L1: 37,549 L2: 37,218	L1- L2: 3 – 5 – 9 – 11 – 13 - 15
<b>Sodio 100 W</b>	L1: 4,269 L2: 4,331	L1: 35,373 L2: 39,643	L1- L2: 3 – 5 – 9 – 11
<b>LED 90 W</b>	L1: 4,265 L2: 4,455	L1: 9,075 L2: 8,731	L1- L2: 5
<b>LED G 150 W</b>	L1: 3,217 L2: 3,305	L1: 8,313 L2: 7,488	L1- L2: 5
<b>LED P 150 W</b>	L1: 3,267 L2: 3,268	L1: 9,501 L2: 9,365	L1- L2: 3 - 5

## 5.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE ARMÓNICOS PARA DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ALUMBRADO

Al analizar cada luminaria individualmente, se encontró que la tecnología LED funcionó mejor que las lámparas de vapor de sodio. Esto se aprecia especialmente en las luminarias 5 y 6, que

se utilizan para el alumbrado público. Sin embargo, se detectó un ligero inconveniente relacionado con el quinto armónico, cuyo valor supera el 4% para ambas luminarias, superando así el límite permitido por la normativa vigente. A pesar de este detalle, el resto de armónicos se encuentran dentro de parámetros aceptables, lo que indica un adecuado comportamiento global de las luminarias en términos de calidad energética.

Se sabe que los elementos no lineales presentes en las luminarias generan armónicos impares, siendo los armónicos tercero, quinto y noveno los más notables. Estos armónicos pueden tener varios efectos negativos en la red eléctrica y los dispositivos conectados. En particular, el tercer armónico tiende a acumularse en el conductor neutro y generar sobrecalentamiento, lo que puede acortar la vida útil de los cables y aumentar el riesgo de falla. Por otro lado, el quinto armónico afecta la forma de onda del voltaje y crea distorsiones que pueden reducir la eficiencia de equipos eléctricos como transformadores y motores y provocar vibraciones o ruido en estos últimos. Ambos armónicos también pueden causar interferencias electromagnéticas (EMI), que pueden afectar el rendimiento de equipos electrónicos sensibles como sistemas de comunicaciones o de control, así como sobrecargar los bancos de capacitores diseñados para la corrección del factor de potencia.

Según estudios técnicos, los controladores utilizados en la tecnología LED juegan un papel crucial en la generación y control de estos armónicos. Las luces LED de alta calidad contienen en su diseño componentes electrónicos como supresores de armónicos, que permiten minimizar estos efectos negativos sobre la red eléctrica. Por lo tanto, es importante elegir luminarias con controladores eficientes y componentes de alto rendimiento para garantizar una menor distorsión armónica, proteger los sistemas eléctricos y prolongar la vida útil de los equipos conectados.

En la tecnología de sodio, se observa que los armónicos de tensión están dentro de los límites establecidos por la normativa vigente. Sin embargo, al analizar la presencia de armónicos en la corriente, se detecta un alto grado de distorsión armónica, la cual es generada por esta tecnología. Los valores de los armónicos individuales pueden superar los límites permitidos en aproximadamente un 10% o incluso un 20%. Estos altos niveles armónicos son generados principalmente por las cargas no lineales presentes en los balastos, ya que al encender estas luminarias se requiere un aumento significativo de corriente. A diferencia de la tecnología LED, las lámparas de vapor de sodio no están equipadas con supresores de armónicos, lo que significa que alimentan los armónicos directamente a la red eléctrica. Esto puede afectar negativamente

la calidad de la energía y causar problemas como sobrecalentamiento de los cables, reducción de la vida útil de los equipos conectados y mayor distorsión de la forma de onda del voltaje, lo que a su vez puede afectar el rendimiento de todo el sistema eléctrico.

Al verificar los datos disponibles en el geoportal de ELEPCO S.A. De la información disponible se encontró que las tecnologías predominantes en el alumbrado público son las lámparas de vapor de sodio con potencias de 150 W y 250 W. Estos datos dan lugar a una reflexión sobre la rentabilidad del uso continuado de estas lámparas, especialmente en términos de calidad energética, eficiencia eléctrica e impacto medioambiental.

Aunque las lámparas de vapor de sodio son ampliamente utilizadas debido a su alta eficacia luminosa, presentan varias desventajas en términos de calidad energética. Su funcionamiento requiere un elevado consumo energético y genera importantes armónicos en la red eléctrica, lo que afecta a la eficiencia de los sistemas conectados. Además, la vida útil de estas lámparas es limitada en comparación con tecnologías más modernas como los LED, lo que conlleva costes recurrentes de mantenimiento y sustitución.

Por otra parte, la falta de sistemas integrados de supresión de armónicos en las lámparas de sodio de alta presión contribuye a la distorsión de la forma de onda eléctrica, lo que puede provocar problemas como sobrecalentamiento de los cables, acortamiento de la vida útil de otros equipos eléctricos y un deterioro general de la calidad del suministro de energía. Por estas razones, es evidente que es necesario explorar alternativas más eficientes y sostenibles, como la tecnología LED, que no sólo consume menos energía sino que también ofrece mejor calidad de luz, mayor vida útil y menor impacto en la red eléctrica. Este análisis es crucial para determinar si es viable y tiene sentido a largo plazo mantener las lámparas de vapor de sodio como la tecnología dominante en el alumbrado público.

### **5.3 CASO DE ESTUDIO 1 – SISTEMA CON UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO Y TRIFÁSICO**

En el siguiente caso de estudio se realizó una simulación para analizar la introducción de armónicos a la red mediante un sistema con transformador monofásico y trifásico.

### 5.3.1 Escenario 1: Simulación de un sistema con un transformador monofásico y trifásico

Se presenta el escenario 1, en el cual se simuló el sistema considerando un transformador monofásico y un transformador trifásico de 30 kVA. Como resultado de esta simulación, se observa una baja presencia de armónicos en ambos transformadores, cabe resaltar que la mayor presencia de armónicos es en el transformador monofásico.

Con un THD I del 0,932% en transformador trifásico que corresponde al ingreso del transformador trifásico, dicho porcentaje de distorsión armónica total cumple con lo establecido en la regulación ARCENNR 003-23. A continuación en la Figura 29, se presencia leves armónicos de su respectivo nivel.



Figura 29. Armónicos individuales en el transformador trifásico.

Para el escenario del transformador monofásico Figura 30, se observa la presencia de armónicos al ingreso del transformador. En particular, se evidencia una leve distorsión armónica. Teniendo en cuenta el contenido armónico total THD I de 1,243%

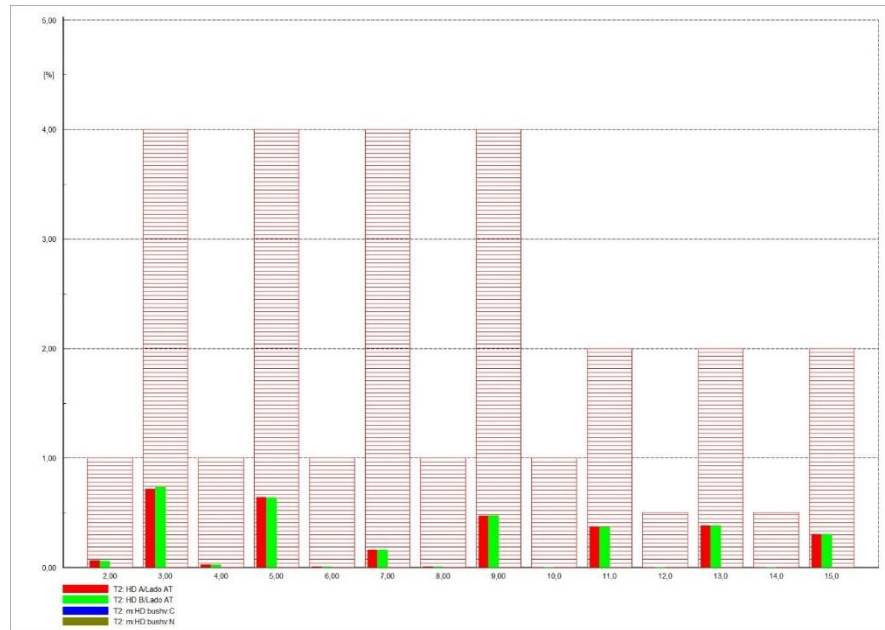


Figura 30. Armónicos individuales en el transformador monofásico .

#### 5.4 CASO DE ESTUDIO 2 – ALIMENTADOR

En el segundo caso de estudio, se evaluará la distorsión armónica del sistema considerando que este cuenta con 40004 terminales y 974 transformadores, los que se estima que el 75% son de uso público.

Para determinar la cantidad de luminarias asignadas a cada transformador se extrajo una muestra de Geoportal de Elepco S.A. de la disposición de los transformadores para el alumbrado público, obteniendo como resultado los datos presentados en el capítulo 4 Tabla 21. Adicionalmente, se consideró el porcentaje de luminarias actualmente instaladas en el sistema, información que se puede visualizar en la Figura 6, lo que permitió estimar la cantidad aproximada de luminarias por tecnología.

Por otro lado, para definir las diferentes potencias utilizadas en cada grupo de tecnologías de iluminación, se elaboró la Tabla 33, donde se detalla la distribución de luminarias según su potencia.

Tabla 33. Disposición de luminarias por potencia.

TECNOLOGÍA	POTENCIA	LUMINARIAS	%
SODIO	100	2928	34%
	150	2447	29%
	250	2219	26%
	400	953	11%
LED	90	309	28%
	150	788	72%

#### 5.4.1 Escenario 1: Situación actual de las tecnologías del alumbrado público del sistema de San Rafael

Para el escenario 1 por la cantidad de barras en el sistema se analizará la presencia del THD I y niveles armónicos en los transformadores se tomó una barra en la zona norte, centro y sur.

A continuación, se presenta la Figura 31 donde se puede visualizar el nivel armónico en el ingreso del transformador TBC (117) de la parte norte del sistema. Donde se presenta un THD I es del 1,62%. Dichos valores se encuentran en el rango admisible.

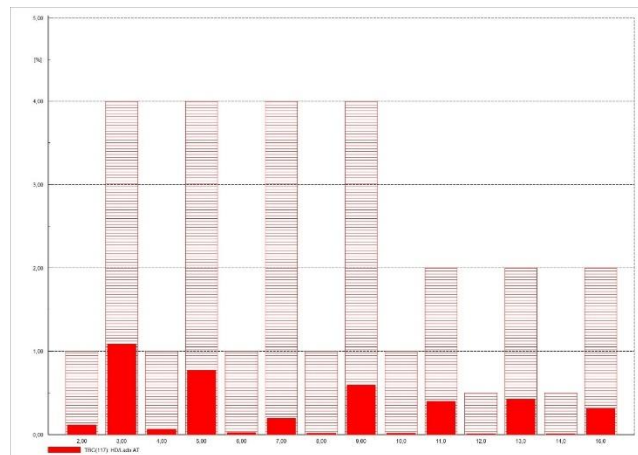


Figura 31. C1\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117).

Se continúa en la zona central del sistema, en la Figura 32 se presenta la distorsión armónica en el ingreso transformador TR\_TRT0019(15) con un THD I de 2,20%.

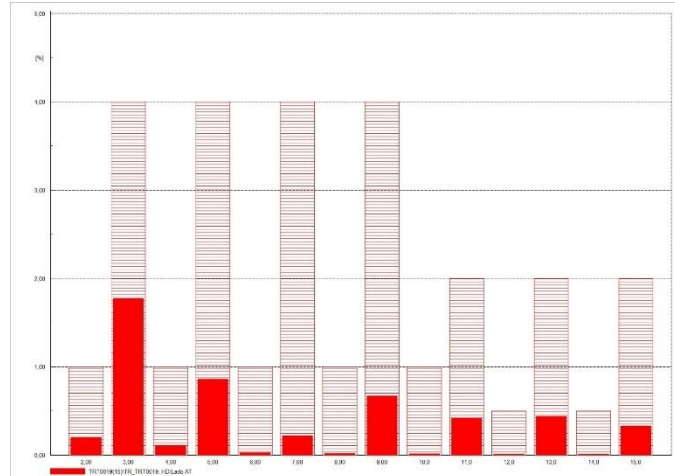


Figura 32. C1\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TR\_TRT0019(15).

Para finalizar en la Figura 33, se realizará el análisis en el transformador que se evaluará la zona sur del sistema, con el transformador TELN (138) con un THD I de 1,702% en el ingreso del transformador.

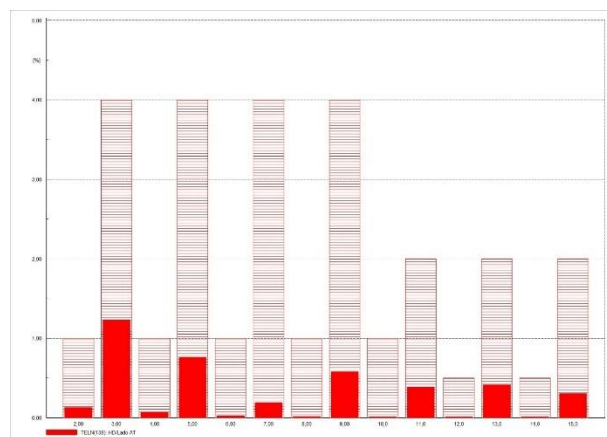


Figura 33. C1\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138).

Se puede observar que en el sistema cumple con lo establecido en la regulación vigente en el Ecuador, siendo destacable que la mayor presencia armónica es en el tercer nivel

#### 5.4.2 Escenario 2: Proceso de cambio de tecnologías del alumbrado público del sistema de San Rafael

Para el escenario 2 se simulará el sistema en transición que se supondría que el 50% de luminarias de la tecnología predominante en el sistema y el otro 50% son las que presentan menor cantidad de armónicos, se considera este escenario puesto que el cambio brusco de tecnologías no es posible si no debe ser progresivo.

A continuación, se presenta la Figura 34 se puede visualizar el nivel armónico en el ingreso del transformador TBC (117) de la parte norte del sistema. Donde se presenta un THD I de 1.006%. Dichos valores se encuentran en el rango admisible.

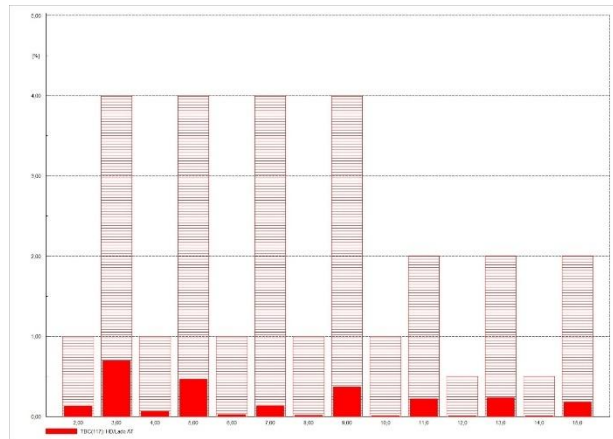


Figura 34. C2\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117).

Se continua en la zona central del sistema, en la Figura 35 se presenta la distorsión armónica en el ingreso del transformador TR\_TRT0019 (15) con un THD I de 1.252%.

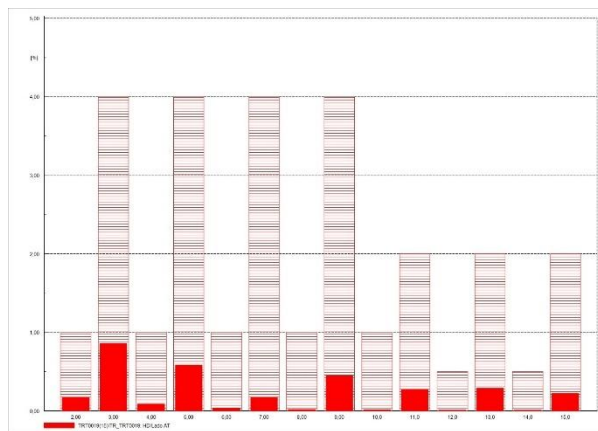


Figura 35. C2\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TR\_TRT0019 (15).

Para finalizar en la Figura 36, se realizará el análisis del transformador y se evaluará la zona sur del sistema, con el transformador TELN (138) se tiene un THD I de 1,06% en el ingreso del transformador.

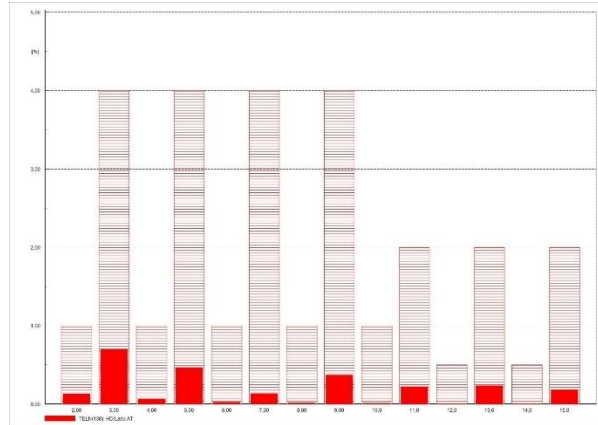


Figura 36. C2\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138).

Se puede observar que en el sistema cumple con lo establecido en la regulación vigente en el Ecuador, siendo destacable que la mayor presencia armónica es en el tercer nivel

### 5.4.3 Escenario 3: Transición completa de las tecnologías del alumbrado público del sistema de San Rafael

Para el escenario 3 se simulará el sistema una vez terminado la transición de tecnologías de iluminación para el alumbrado público por otra tecnología con menos armónicos.

A continuación, se presenta la Figura 37 se puede visualizar el nivel armónico en el ingreso del transformador TBC (117) de la parte norte del sistema. Donde se presenta un THD I es del 0,3%. Dichos valores se encuentran en el rango admisible.

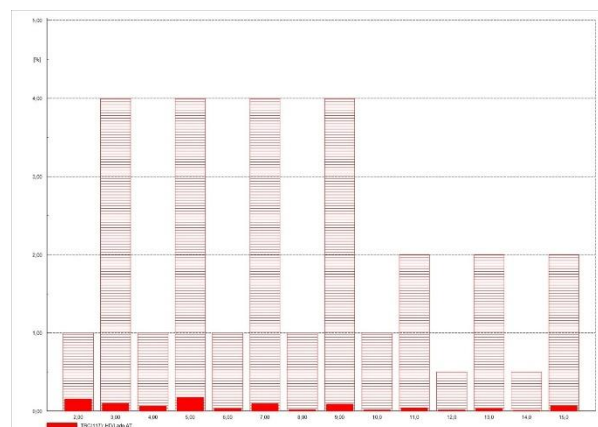


Figura 37. C3\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117).

Se continua en la zona central del sistema, en la Figura 38 se presenta la distorsión armónica en el ingreso del transformador TR\_TRT0019 (15) con un THD I de 0.5%.

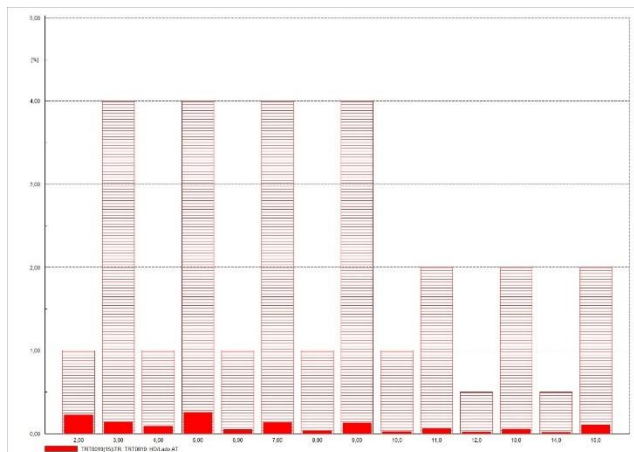


Figura 38. C3\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TR\_TRT0019 (15).

Para finalizar en la Figura 39, se realizará el análisis en el transformador y se evaluará la zona sur del sistema, con el transformador TELN (138) da un THD I de 0,3% en el ingreso del transformador.

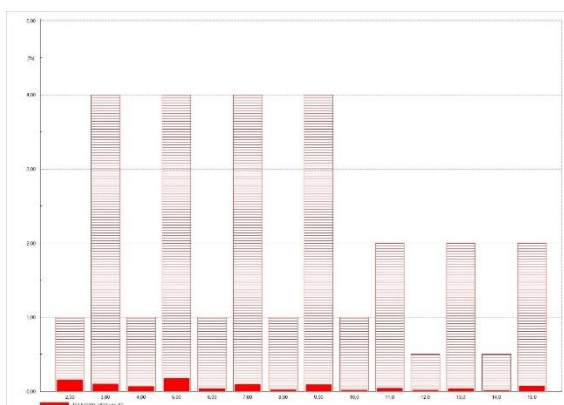


Figura 39. C3\_Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138).

Se puede observar que en el sistema cumple con lo establecido en la regulación vigente en el Ecuador, siendo destacable que la mayor presencia armónica es en el tercer nivel.

#### 5.4.4 Escenario 4: Aleatoriedad de la introducción de armónicos por cada tecnología de iluminación.

En este escenario se simulará el sistema con cargas armónicas aleatorias aplicando un 10%-15% más a la introducción de armónicos en la red y analizar el comportamiento en si cumple con la normativa.

A continuación, se presenta la Figura 40 se puede visualizar el nivel armónico en el ingreso del transformador TBC (117) de la parte norte del sistema. Donde se presenta un THD I de 1,686%. Dichos valores se encuentran en el rango admisible.

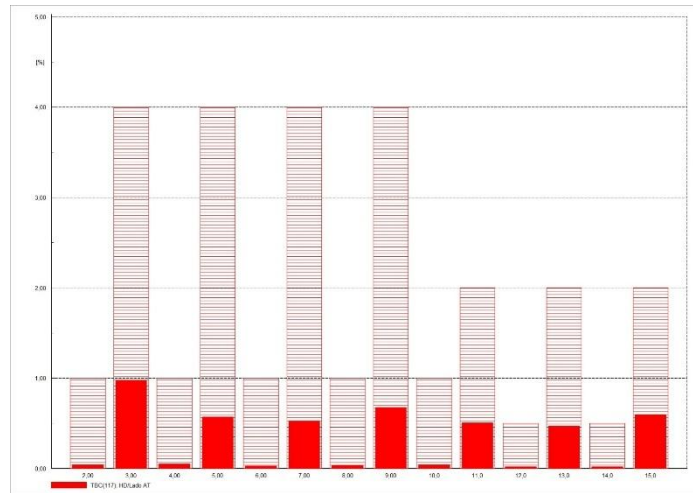


Figura 40. C4\_ Distorsión armónica en la entrada del transformador TBC (117).

Se continua en la zona central del sistema, en la Figura 41 se presenta la distorsión armónica en el ingreso del transformador TR\_TRT0019 (15) con un THD I de 2,080%.

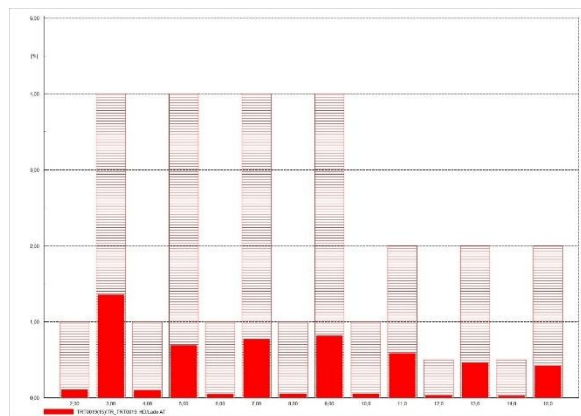


Figura 41. C4\_ Distorsión armónica en la entrada del transformador TR\_TRT0019 (15).

Para finalizar en la Figura 42, se realizará el análisis del transformador y se evaluará la zona sur del sistema, con el transformador TELN (138) se tiene un THD I de 1,816% en el ingreso del transformador.

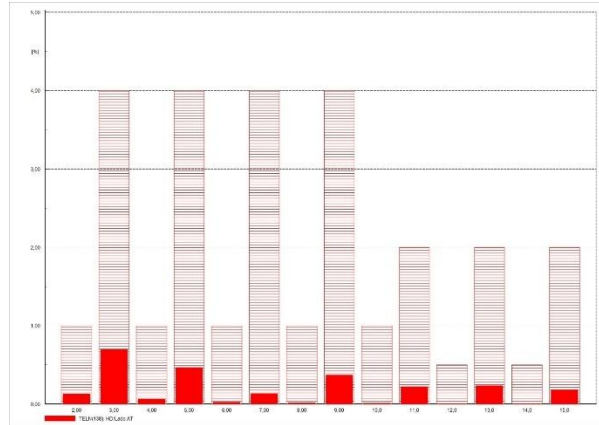


Figura 42. C4\_ Distorsión armónica en la entrada del transformador TELN (138).

Se puede observar que en el sistema cumple con lo establecido en la regulación vigente en el Ecuador, siendo destacable que la mayor presencia armónica es en el tercer nivel

#### 5.4.5 Comparación de los índices de calidad en del sistema

En el siguiente apartado se presenta la Tabla 34 y Tabla 35, donde se resume en la distorsión armónica total de cada escenario y si cumple con lo establecido en la regulación vigente.

Tabla 34. Comparación de Distorsión armónica total, parte A.

Escenario	Transformadores	THD I [%]	Mayor nivel armónico	Cumplimiento de la normativa
1	TBC (117)	1,62	Orden 3	Cumple
	TR_TRT0019 (15)	2,20	Orden 3	Cumple
	TELN (138)	1,702	Orden 3	Cumple

Tabla 35. Comparación de Distorsión armónica total, parte B.

Escenario	Barra	THD I [%]	Mayor nivel armónico	Cumplimiento de la normativa
2	TBC (117)	1.006	Orden 3	Cumple
	TR_TRT0019 (15)	1,252	Orden 3	Cumple
	TELN (138)	1,06	Orden 3	Cumple
3	TBC (117)	0,3	Orden 2	Cumple
	TR_TRT0019 (15)	0,5	Orden 2	Cumple
	TELN (138)	0,3	Orden 2	Cumple
4	TBC (117)	1,868	Orden 3	Cumple
	TR_TRT0019 (15)	2,08	Orden 3	Cumple
	TELN (138)	1,816	Orden 3	Cumple

Se determina que se cumple con la norma establecida al tener que la distorsión armónica total de corriente no supera el 5% , teniendo en cuenta que su mayor presencia de armónicos es en sistema actual, en el escenario 2 se encuentra una reducción entre 0% y el 10% lo cual muestra que el cambio de luminarias es viable en cuanto mejorar la calidad energética. Sin embargo, se ve una drástica reducción de armónicos una vez cambiada la tecnología de sus luminarias.

Para evitar el exceso de datos en el documento de investigación, se seleccionará transformadores tabla y líneas de cada escenario de tal manera que podremos evaluar el impacto del cambio de tecnología de alumbrado público, a continuación, en la Tabla 36 y Tabla 37 se presenta el THD V y THD I en los transformadores, estos transformadores fueron considerados por mayor corriente nominal, ya que en la menor corriente su distorsión se podría considerar despreciable.

Tabla 36. Comparación de escenarios con transformadores, parte A.

	Transformador	Barra/terminal	Cargabilidad[%]	Corriente lado AT [A]	THD I [%]	THD V [%]	Potencia Activa Lado AT [KW]
<b>Escenario 1</b>	TR_TRT0018	TRT0018(28).	121,664	1,527	1,827	0,533	33,678
	TR_TRT0018	TRT0018(82).	118,370	1,486	1,984	0,475	35,253
	TR_TRT0022	TRT0022(3).	117,387	3,683	1,782	0,479	82,301
	TBC(113)	AMT_SAN RAFAEL	114,298	2,869	0,719	0,852	59,527
	TBC(72)	AMT_SAN RAFAEL	111,995	1,406	1,991	0,810	29,386
	TBC(123)	AMT_SAN RAFAEL	111,783	1,403	2,024	0,861	29,085
	TBC(97)	AMT_SAN RAFAEL	111,054	2,323	1,881	0,832	48,414
	TSRN(19)	AMT_SAN RAFAEL	109,981	2,301	1,643	0,472	51,490
	TSRN(82)	AMT_SAN RAFAEL	108,736	2,275	1,663	0,509	50,360
	TR_TRT0019	TRT0019(16).	107,052	2,015	2,153	0,502	44,693
<b>Escenario 2</b>	TR_TRT0018	TRT0018(28).	120,823	1,517	1,006	0,444	33,459
	TR_TRT0018	TRT0018(82).	117,619	1,476	1,006	0,395	35,034
	TR_TRT0022	TRT0022(3).	117,383	3,683	1,619	0,398	82,303
	TBC(113)	AMT_SAN RAFAEL	114,059	2,866	0,000	0,718	59,534
	TBC(72)	AMT_SAN RAFAEL	110,947	1,393	1,006	0,681	29,169
	TBC(123)	AMT_SAN RAFAEL	110,696	1,390	1,006	0,725	28,868
	TBC(97)	AMT_SAN RAFAEL	110,656	2,316	0,906	0,700	48,339
	TSRN(19)	AMT_SAN RAFAEL	109,803	2,297	0,906	0,390	51,411
	TBC(10)	AMT_SAN RAFAEL	108,878	1,367	1,006	0,441	30,244
	TR_TRT0019	TRT0019(16).	105,768	1,991	1,252	0,418	44,164
<b>Escenario 3</b>	TR_TRT0018	TRT0018(28)	119,418	1,499	0,313	0,090	33,099
	TR_TRT0018	TRT0018(82)	116,359	1,460	0,313	0,080	34,674
	TR_TRT0022	TRT0022(3)	114,452	3,591	0,299	0,081	80,303
	TBC(113)	AMT_SAN RAFAEL	113,699	2,856	0,000	0,149	59,534
	TBC(72)	AMT_SAN RAFAEL	109,248	1,372	0,313	0,141	28,809
	TBC(97)	AMT_SAN RAFAEL	109,236	2,287	0,307	0,145	47,870
	TBC(123)	AMT_SAN RAFAEL	108,943	1,368	0,313	0,150	28,508
	TSRN(19)	AMT_SAN RAFAEL	108,763	2,275	0,307	0,079	50,941
	TSRN(82)	AMT_SAN RAFAEL	107,476	2,248	0,307	0,086	49,811
	TR_TRT0019	TRT0019(16)	104,823	1,974	0,450	0,085	43,794

Tabla 37. Comparación de escenarios con transformadores, parte B.

	Transformador	Barra/terminal	Cargabilidad[%]	Corriente lado AT [A]	THD I [%]	THD V [%]	Potencia Activa Lado AT [KW]
<b>Escenario 4</b>	TR_TRT0018	TRT0018(28)	121,664	1,527	1,809	0,488	33,678
	TR_TRT0018	TRT0018(82)	118,370	1,486	1,946	0,434	35,253
	TR_TRT0022	TRT0022(3)	117,387	3,683	1,718	0,438	82,301
	TBC(113)	AMT_SAN RAFAEL	114,298	2,869	0,640	0,790	59,527
	TBC(72)	AMT_SAN RAFAEL	111,995	1,406	1,878	0,749	29,386
	TBC(123)	AMT_SAN RAFAEL	111,783	1,403	2,029	0,798	29,085
	TBC(97)	AMT_SAN RAFAEL	111,054	2,323	1,776	0,770	48,414
	TSRN(19)	AMT_SAN RAFAEL	109,981	2,301	1,580	0,432	51,490
	TSRN(82)	AMT_SAN RAFAEL	108,736	2,275	1,625	0,466	50,360
	TR_TRT0019	TRT0019(16)	107,052	2,015	2,393	0,460	44,693

Se puede evidenciar que en la situación actual del sistema presenta armónicos, pero siguen dentro de la normativa vigente, mientras que el segundo escenario se presenta una mejoría considerable teniendo en cuenta que solo se ha cambiado un 50% de las luminarias actuales por otra luminaria con menor producción de armónicos. Una vez cambiado el sistema a Led cuya producción armónica tanto en voltaje y corriente es menor, como se puede observar en la Tabla 32. Dicha situación también se repite en las líneas de transmisión donde al cambiar de tecnología de iluminación en la transición desde el estado actual a un estado más óptimo en términos de calidad de energía.

En la Tabla 38 y Tabla 39 se puede observar la distorsión armónica total en las líneas pues es donde se encuentran los armónicos de corriente y voltaje, se consideró las líneas con mayor corriente nominal.

Tabla 38. Muestra de distorsión armónica total de sistema en líneas, parte A.

	Línea	Red	Corriente [A]	THD I [%]	THD V [%]	Pérdidas armónicas [kW]	Cargabilidad [%]
<b>Escenario 1</b>	4	AMT_SAN RAFAEL	208,091	2,040	0,446	11,238	86,343
	3	AMT_SAN RAFAEL	208,090	2,040	0,443	3,447	86,342
	2	AMT_SAN RAFAEL	208,090	2,040	0,443	0,633	86,342
	Alimentador 1 BP LC	AMT_SAN RAFAEL	208,090	2,040	0,441	2,183	86,342
	6	AMT_SAN RAFAEL	206,991	2,040	0,456	5,754	85,886
	43	AMT_SAN RAFAEL	196,785	1,963	0,462	10,261	81,651
	45	AMT_SAN RAFAEL	196,001	1,963	0,471	7,531	81,326
	55	AMT_SAN RAFAEL	191,527	1,939	0,479	8,665	79,469
	Alimentador 3 EI N	AMT_SAN RAFAEL	188,993	1,855	0,441	0,994	78,437
	B6	AMT_SAN RAFAEL	188,774	1,855	0,445	2,413	78,347
<b>Escenario 2</b>	4	AMT_SAN RAFAEL	205,514	1,527	0,370	8,276	85,261
	3	AMT_SAN RAFAEL	205,513	1,527	0,368	2,544	85,260
	2	AMT_SAN RAFAEL	205,513	1,527	0,367	0,467	85,260
	Alimentador 1 BP LC	AMT_SAN RAFAEL	205,513	1,527	0,366	1,614	85,260
	6	AMT_SAN RAFAEL	204,414	1,527	0,379	4,230	84,805
	43	AMT_SAN RAFAEL	194,264	1,458	0,383	7,483	80,592
	45	AMT_SAN RAFAEL	193,480	1,458	0,392	5,491	80,267
	55	AMT_SAN RAFAEL	189,025	1,436	0,398	6,312	78,419
	Alimentador 3 EI N	AMT_SAN RAFAEL	186,755	1,334	0,366	0,612	77,497
	B6	AMT_SAN RAFAEL	186,537	1,334	0,369	1,489	77,407

Tabla 39. Muestra de distorsión armónica total de sistema en líneas, parte B.

	Línea	Red	Corriente [A]	THD I [%]	THD V [%]	Pérdidas armónicas [kW]	Cargabilidad [%]
<b>Escenario 3</b>	4	AMT_SAN RAFAEL	198,582	0,371	0,075	0,096	82,376
	3	AMT_SAN RAFAEL	198,582	0,371	0,074	0,030	82,375
	2	AMT_SAN RAFAEL	198,582	0,371	0,074	0,005	82,375
	Alimentador 1 BP LC	AMT_SAN RAFAEL	198,581	0,371	0,074	0,019	82,375
	6	AMT_SAN RAFAEL	197,483	0,371	0,077	0,049	81,919
	43	AMT_SAN RAFAEL	187,676	0,357	0,078	0,088	77,850
	45	AMT_SAN RAFAEL	186,892	0,357	0,079	0,064	77,525
	55	AMT_SAN RAFAEL	182,561	0,353	0,081	0,074	75,728
	Alimentador 3 EI N	AMT_SAN RAFAEL	181,036	0,326	0,074	0,007	75,114
	B6	AMT_SAN RAFAEL	180,818	0,326	0,075	0,017	75,024
<b>Escenario 4</b>	4	AMT_SAN RAFAEL	208,091	1,810	0,408	22,448	86,338
	3	AMT_SAN RAFAEL	208,090	1,810	0,405	6,888	86,337
	2	AMT_SAN RAFAEL	208,090	1,810	0,405	1,265	86,337
	Alimentador 1 BP LC	AMT_SAN RAFAEL	208,090	1,810	0,403	4,364	86,337
	6	AMT_SAN RAFAEL	206,991	1,810	0,417	11,487	85,881
	43	AMT_SAN RAFAEL	196,785	1,743	0,422	20,456	81,646
	45	AMT_SAN RAFAEL	196,001	1,743	0,431	15,004	81,321
	55	AMT_SAN RAFAEL	191,527	1,720	0,438	17,267	79,464
	Alimentador 3 EI N	AMT_SAN RAFAEL	188,993	1,637	0,403	1,968	78,432
	B6	AMT_SAN RAFAEL	188,774	1,637	0,407	4,777	78,342

Al aplicar la aleatoriedad de las cargas armónicas e incrementarla se puede ver una clara diferencia, en la distorsión armónica total en transformadores y líneas, en la Tabla 40 se observa que la diferencia entre el escenario 1 y 4 en los transformadores es mínima a pesar que se le haya incrementado los armónicos.

Tabla 40. Diferencia entre el escenario 1 y escenario 4 de los transformadores.

Transformador	Escenario 1 vs caso 4		
	THD I [%]	THD V [%]	Cargabilidad [%]
TR_TRT0018	0,018	0,045	0,000
TR_TRT0018	0,039	0,040	0,000
TR_TRT0022	0,064	0,041	0,000
TBC(113)	0,078	0,063	0,000
TBC(72)	0,113	0,061	0,000
TBC(123)	0,005	0,063	0,000
TBC(97)	0,105	0,062	0,000
TSRN(19)	0,063	0,040	0,000
TSRN(82)	0,038	0,042	0,000
TR_TRT0019	0,240	0,042	0,000

En las líneas de transmisión Tabla 41, se puede ver la relación del escenario 1 con respecto al escenario 2, comparando la distorsión armonía total y la cargabilidad de las líneas.

Tabla 41. Diferencia entre el escenario 1 y escenario 4 de las líneas.

Línea	Escenario 1 vs caso 4		
	THD I [%]	THD V [%]	Cargabilidad [%]
4	0,230	0,038	0,005
3	0,230	0,038	0,005
2	0,230	0,038	0,005
Alimentador 1 BP LC	0,230	0,038	0,005
6	0,230	0,039	0,005
43	0,220	0,039	0,005
45	0,220	0,040	0,005
55	0,219	0,041	0,005
Alimentador 3 El N	0,218	0,038	0,005
B6	0,218	0,038	0,005

Se puede visualizar que la variabilidad e incremento de los armónicos, pese a mantenerse en los límites establecidos presenta una mayor pérdida por armónicos en las líneas, esto se debe a que los armónicos se le asocia a la sobrecarga de los conductore ya que las los armónicos tienden a sumarse en el neutro y no cancelarse, incluso incrementa un poco su cargabilidad contrario a los transformadores que su cargabilidad no tiene afecciones.

## 5.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DE DIFERENTES TECNOLOGÍA DE ILUMINACIÓN

En este apartado, se analizará un estado económico donde se considera el reemplazo total de la tecnología sodio por tecnología led. Esto se realizó con los datos de la Tabla 33, donde se tomó

en cuenta el escenario 3 y se sacó un costo total de cuanto sería la inversión para mejorar la red de distribución por la introducción de armónicos producidos por las luminarias de sodio. Entonces en la Tabla 42, se muestra primero el costo para el desmontaje de las luminarias sodio, en el Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4 donde se desglosan los costos del desmontaje.

Tabla 42. Costo de desmontaje para luminarias de sodio.

<b>LUMINARIAS SODIO</b>			
<b>POTENCIA [W]</b>	<b>COSTO UNITARIO TOTAL PARA DESMONTAJE [USD]</b>	<b>CANTIDAD LUMINARIAS SUB. SAN RAFAEL</b>	<b>COSTO TOTAL PARA DESMONTAJE [USD]</b>
100	10,02	2928	\$29.338,56
150	10,02	2447	\$24.518,94
250	10,02	2219	\$22.234,38
400	10,02	953	\$9.549,06
<b>TOTAL</b>		8547	\$85.640,94

Como se observa en la Tabla 42, para un desmontaje de luminarias sodio de potencia entre 100 W y 400 W se tiene un costo unitario total de 10,02 dólares, tal que, tomando en cuenta que, en el primer escenario del estado actual, estas tecnologías predominan en un 85% y si se realizaría un reemplazo, de un total de 8547 luminarias de la Subestación San Rafael tendríamos un valor de 85.640,94 dólares para el desmontaje de las luminarias.

Ahora que se realizó un costo de solo desmontaje también se necesitaría el costo de montaje de las luminarias LED, como se muestra en la siguiente Tabla 43, se obtuvo los costos unitarios para esta tecnología basándose en el Anexo 5.

Tabla 43. Costo de montaje para luminarias LED.

<b>LUMINARIAS LED</b>			
<b>POTENCIA [W]</b>	<b>COSTO UNITARIO TOTAL PARA MONTAJE [USD]</b>	<b>CANTIDAD LUMINARIAS SUB. SAN RAFAEL</b>	<b>COSTO TOTAL PARA MONTAJE [USD]</b>
90	184,4	2393	\$441.298,70
150	184,4	6154	\$1.134.768,10
<b>TOTAL</b>		8547	\$1.576.066,80

Como se muestra en la Tabla 43, para un montaje de luminarias LED de potencia entre 90 W y 150 W se tiene un costo unitario de cada uno por 184,4 dólares, entonces considerando que se va hacer un reemplazo de tecnología de luminaria sodio por LED se tendría un total de las 8547 luminarias, esto dando un costo total de 1.576.066,80 dólares.

Ahora como se muestra en la Tabla 44, se obtuvo el costo total de cambio de tecnología.

Tabla 44. Costo total de cambio de tecnología.

<b>COSTO TOTAL DE CAMBIO DE TECNOLOGÍA</b>	
Costo total Desmontaje	\$85.640,94
Costo total Montaje	\$1.538.460,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$1.624.100,94</b>

Como se observa en la Tabla 44, para el cambio total de tecnología de sodio a LED tendría un costo de 1.624.100,24 dólares, siendo que no sea rentable pero esta tecnología ayudaría a mejorar la calidad eléctrica en la red de distribución.

Dentro del sistema eléctrico se sabe que la mayoría de las luminarias son las de sodio y poca LED, por lo que se comparó flujo luminoso y vida de las luminarias como se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45. Comparativa sodio y LED.

	<b>Tiempo de vida [h]</b>	<b>Flujo luminoso [lm]</b>	<b>Años de vida útil</b>
<b>Sodio</b>	30000	6000 - 48000	7
<b>Led</b>	50000	8000 - 32500	11

En la Tabla 45 se muestra datos de años de vida útil comparando con luminaria de sodio y LED, dando a entender que la segunda luminaria es la más duradera en cuanto a funcionamiento y contiene un mayor flujo luminoso.

A continuación, como se observa en la Tabla 46, se obtuvo la potencia de pérdidas, para cada escenario del caso 2 del alimentador San Rafael.

Tabla 46. Potencia de pérdidas.

	Potencia Activa kW	Pérdidas por armónicos en transformadores [kW]	Pérdidas por armónicos en líneas [kW]	Total, de potencia perdida [kW]	Pérdidas de energía [kWh]	Precio de energía [USD/kWh]
<b>Escenario 1</b>	11870,719	7,863	368,498	376,361	4516,334	0,044
<b>Escenario 2</b>	11755,768	1,804	261,970	263,774	3165,289	0,044
<b>Escenario 3</b>	11420,132	0,018	3,071	3,089	37,072	0,044
<b>Escenario 4</b>	11870,719	16,362	730,848	747,209	8966,513	0,044

En la Tabla 46, muestra los potencia de pérdidas en base a la introducción de armónicos de diferentes tecnologías en la red, considerando el precio de la energía de 0,044 dólares-kilowatts hora que es establecido por la ARCERNNR 2024 [30], esto se tomó datos de los 4 escenarios que se simuló en el software de DigSilent PowerFactory, donde el costo más elevado de potencia de pérdidas se encuentra en el cuarto escenario dado que se aplicó cargas armónicas aleatorias con un valor de 143.146,77 dólares al año siendo un escenario menos eficiente. Comparando tres escenarios, si se denota las pérdidas en el transformador y en las líneas esto por el reemplazo de tecnología.

A continuación, se muestra la Tabla 47, que son costos totales de alumbrado público.

Tabla 47. Costos totales del alumbrado público.

	Participación de la luminaria en la demanda del sistema [%]	Potencia activa luminarias [kW]	Costo de consumo de la energía por SAPG [USD/año]	Costo total potencia de pérdidas [USD/Año]
<b>Escenario 1</b>	15%	1821,66	\$348.984,51	\$ 72.101,46
<b>Escenario 2</b>	14%	1686,04	\$323.003,36	\$ 50.532,57
<b>Escenario 3</b>	12%	1350,36	\$258.695,45	\$ 591,85
<b>Escenario 4</b>	15%	1821,66	\$348.984,51	\$ 143.146,77

En la Tabla 47, se puede observar la participación de la luminaria en la demanda del sistema, haciendo la comparativa del escenario 1 con el escenario 3 hay una diferencia del 3% debido al reemplazo de tecnología sodio con tecnología led, se ve reducida su demanda en el sistema, siendo así un menor consumo y la reducción en pérdidas de potencia por armónicos en el SAPG.

Dado este punto, en la Tabla 48 se puede visualizar el ahorro en el sistema del escenario actual con la transición del 50%-50% sodio-led y el escenario 100% LED.

Tabla 48. Ahorro total del sistema.

	<b>Ahorro en consumo [USD/año]</b>	<b>Ahorro en pérdidas [USD/año]</b>	<b>Total, de ahorro [USD/año]</b>
<b>Escenario 1 vs 2</b>	\$ 25.981,15	\$ 21.568,89	\$ 47.550,04
<b>Escenario 1 vs 3</b>	\$ 90.289,06	\$ 71.509,61	\$161.798,67

La información de la Tabla 48, da a entender que en la comparativa del escenario 1 versus escenario 3 es factible en temas de potencia y pérdidas por armónicos, así como el costo de consumo y pérdidas de potencia. En el escenario 1 versus escenario 2 representa ganancia en el ahorro de consumo y pérdidas de potencia, pero se diferencia es 3 veces inferior al escenario 3.

### 5.5.1 Viabilidad del reemplazo de tecnología sodio por tecnología LED

Para la viabilidad del proyecto se tomó en consideración el Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), esto con la finalidad de saber cuándo se recupera la inversión y el beneficio en el transcurso del año. Como se muestra en la Tabla 44, se tiene los siguientes valores tal para el escenario 3 sabiendo que su inversión es de \$1.624.100,94.

Para el análisis se calcula en el transcurso de 10 años, sabiendo que la inflación anual promedio es de 2,5 % [31], su ahorro en pérdidas anual es de \$161.798,67, como se puede visualizar en la Tabla 48.

Continuando tenemos en la Tabla 49 el Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), tomando en cuenta su flujo económico como esta en el Anexo 6.

Tabla 49. Valor actual neto y Tasa interna de retorno.

	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>
VAN	<b>\$-499.897,54</b>	<b>\$-497.954,73</b>
TIR	-7%	2%

Al analizar el VAN se puede decir que el proyecto de reemplazar al 100% tecnología LED en el escenario 3 haciendo que no es viable pues su valor menor de 0 la inversión produce pérdidas y el proyecto debe rechazarse. Por lo tanto, el TIR es positivo de un 2%, pero no puede ser beneficioso. En el caso de la transición del reemplazo del 50% sodio por led, tenemos un VAN de \$-4 99.897,54 dólares por lo que, el proyecto no es viable y un TIR de -7 % que es el beneficio de la inversión.

## 6. CONCLUSIONES

Al analizar las tecnologías de iluminación en el alumbrado público, se utiliza las luminarias de sodio en un 85% y LED en un 15% . Sin embargo, estas tecnologías presentan diversas desventajas en términos de calidad energética. Aunque cada luminaria individualmente no representa una amenaza significativa, la acumulación de múltiples unidades puede generar un impacto considerable sobre la red eléctrica. Los armónicos generados por los balastos no lineales de las luminarias de sodio afectan la calidad de la energía, contribuyendo al sobrecalentamiento de cables. Además, el alto consumo energético de estas luminarias, dado que aumenta la demanda de electricidad.

Al analizar la simulación en el software DigSilent PowerFactory de la introducción de armónicos en la red por diferentes tecnologías de iluminación, podemos observar el comportamiento de la red. Dado que en el primer escenario se simuló el estado actual de la red de la Subestación San Rafael, dando como resultado un promedio de THD I de 1,414 % con mayor participación del tercer armónico a diferencia del resto de los armónicos impares y sus costos por pérdidas de potencia por armónicos es de \$ 72.101,46, el segundo escenario de una transición de un 50 % luminarias sodio y 50 % luminarias LED, en este escenario al reemplazar la mitad de luminarias de sodio a led, dando como resultado un THD I es 0,886 %, teniendo una reducción del 0,528 % de la distorsión armónica total y un costo de \$ 50.532,57 con respecto a la situación actual, de igual manera presenta armónicos impares hasta el nivel 15 y su armónico más representativo es el tercero, el tercer escenario se realiza el reemplazo total de luminarias sodio por LED, donde se puede observar que su THD I del 0,267 %, de tal manera se observa una reducción del 1,147 % en su THD y su reducción en pérdidas de potencia por armónicos \$ 591,85 desde el escenario actual. También, se simulo un cuarto escenario aplicando aleatoriedad en cargas armónicas e incrementando un 15% cada nivel armónico, evidenciando un THD I del 1,445 % con un incremento del 0,031 en comparación a la situación actual; en este contexto su incremento es mínimo pero se puede observar que los costos de pérdidas de potencia por armónicos es del \$143.146,77, siendo el doble del escenario 1, al incrementar sus armónicos afectaría a las líneas y transformadores, por ende sus pérdidas se incrementan, también se puede ver que la cargabilidad tanto de transformadores como líneas se reduce gradualmente esto es debido al cambio de luminarias y potencias de las mismas, dando como escenario más beneficioso tanto en términos de consumo, perdidas y producción de armónicos al escenario 3.

En el caso 1 donde se observa un transformador trifásico y un transformador monofásico en las mismas condiciones y con cargas similares, se observa la presencia de armónicos de corriente en ambos transformadores, con un THD I de 0,932 % en el transformador trifásico y un THD I 1,243 % en el transformador monofásico, pudiéndose observar que el tipo de transformador influye en la introducción de armónicos, siendo que el transformador monofásico supera en un 0,311 % al THD I del transformador trifásico, sin embargo ambos transformadores muestran que la mayor presencia armónica es en el tercer nivel.

Al analizar el tercer escenario, el cambio de tecnología es viable en términos de potencia, por su baja producción de armónicos y consumo eléctrico, pero al enfocarnos en la factibilidad de reemplazar la tecnología de iluminación tiene una inversión muy alta ya que se debe cubrir un costo de instalación y desinstalación de las luminarias, después de analizar su rentabilidad siendo de \$ -497.954,73 nos muestra que no se podrá obtener ganancias y su tasa de retorno sea del 2 % nos muestra que no es beneficioso invertir en el proyecto. Por otra parte, se analizó el segundo escenario, dando una pérdida de \$ -499.897,54 lo cual nos indica que realizar el cambio parcial de tecnología no es viable y su rentabilidad - 7 % no es viable y debe ser rechazado ambos casos.

## **7. RECOMENDACIONES**

Ante los problemas asociados a las lámparas de sodio, se recomienda una transición hacia tecnologías más eficientes y sostenibles como las lámparas LED. Estos ofrecen importantes ventajas, como un menor consumo de energía, lo que contribuye a menores costos operativos e impacto ambiental; vida útil más larga, lo que reduce la frecuencia de reemplazo y los costos de mantenimiento; una mejor calidad de iluminación, que mejora la visibilidad y la seguridad en los espacios públicos; y una reducción de la producción de armónicos, minimizando las distorsiones en la red eléctrica y mejorando la calidad del suministro.

Dado que una transición inmediata no es económica y logísticamente viable, se sugiere implementar un reemplazo progresivo en áreas estratégicas con baja visibilidad o alto grado de incertidumbre. Así mismo, para proyectos de ampliación de alumbrado público se recomienda priorizar el uso de luminarias LED frente a tecnologías convencionales.

Se recomienda la utilización de los equipos de medición calibrados, para mediciones más exactas y con menor margen de error, manipulación correcta de las luminarias dado que algunos elementos son más sensibles.

**8. REFERENCIAS**

- [1] A. C. Henao-Muñoz, J. G. Herrera-Murcia, and A. J. Saavedra-Montes, “Experimental characterization of compact fluorescent lamps for harmonic analysis of power distribution systems,” *TecnoLógicas*, vol. 21, no. 42, pp. 79–94, May 2018, doi: 10.22430/22565337.780.
- [2] S. Yoomak, C. Jettanasen, A. Ngaopitakkul, S. Bunjongjit, and M. Leelajindakrairerk, “Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system,” *Energy Build*, vol. 159, pp. 542–557, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.060.
- [3] K. Ruuth, A. Hilden, J. Rekola, P. Pakonen, and P. Verho, “THE IMPACT OF LED LIGHTING SYSTEMS TO THE POWER QUALITY AND RECOMMENDATIONS FOR INSTALLATION METHODS TO ACHIEVE THE EXPECTED ENERGY EFFICIENCY,” 2019.
- [4] Ł. Putz, K. Bednarek, and R. Nawrowski, “Disturbances generated by lighting systems with LED lamps and the reduction in their impacts,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 22, Nov. 2019, doi: 10.3390/app9224894.
- [5] R. M. Flores Montesdeoca, “Estudio de perturbaciones eléctricas producidos por la iluminación de tecnología LED en una red de distribución,” 2023. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26604>
- [6] M. C. Brusil Guamán, “Análisis de perturbaciones armónicas producidas por luminarias de tecnología LED en una red de alumbrado público,” 2020. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20820>
- [7] A. Paula, A. Fragoso, M. Fortes, V. Ferreira, and A. Pereira, “Harmonic analysis of lighting technology application - case study in distribution network: smart city Buzios,” in *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, Institution of Engineering and Technology, Oct. 2017, pp. 659–662. doi: 10.1049/oap-cired.2017.0627.
- [8] A. Pinheiros Fragoso, M. Paixão Moraes, D. A. Paixão Moraes, and L. G. Ferreira da Silva, “Bibliometric review of the analysis of harmonio losses in public lighting

- systems,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 31, Oct. 2023, doi: 10.4067/S0718-33052023000100222.
- [9] A. Zeghoudi, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, and L. Canale, “Power impact and electromagnetic disturbances of different lighting modes from spot LED lamp,” *Optik (Stuttg)*, vol. 269, p. 169898, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.169898.
- [10] J. Secue, O. Páez, J. Fonseca, and E. Muela, “Análisis de Tecnologías y Normatividad de Iluminación Eficiente en Alumbrado Público,” 2018. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0411.pdf>
- [11] P. C. Acuña Roncancio, “Impacto del Alumbrado Publico con LEDs en la Red de Distribución,” 2011. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7718>
- [12] M. Quintero Quiñonez, K. Y. Simisterra Quiñonez, M. R. Ibarra Caicedo, and V. E. Reyes Bone, “Impact of LED lighting on the energy quality of public lighting circuits,” *Sapienza*, vol. 3, no. 4, pp. 286–301, Jul. 2022, doi: 10.51798/sijis.v3i4.472.
- [13] “Philips QL Induction Lighting Systems,” 2007.
- [14] A. M. Carballeira del Pozo, “Repercusión del uso de la tecnología CFL y LED de iluminación en las redes de distribución,” 2017. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2183/20623>
- [15] D. de los A. Fernández LabradaI, M. Vilaragut LlanesI, E. Casas Morell, E. A. Guerra BlancoI, and M. Castro Fernández, “Beneficios y riesgos de los sistemas de iluminación basada en LEDs,” vol. 45, 2024, Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <http://ref.scielo.org/gywyrw>
- [16] D. J. Medina Villacis and J. C. Santillán Sanisaca, “Efectos en las redes eléctricas de distribución en baja tensión por la aplicación de lamparas Led en el sistema de alumbrado público,” 2023. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25836>
- [17] M. Radka and H. Shuming, “Aceleración de la adopción mundial de la iluminación energéticamente eficiente Programa de las Naciones Unidas para el

- Medio Ambiente (PNUMA)-Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) Unidos por la Eficiencia (U4E, United for Efficiency),” 2016. doi: <https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2017/04/Lighting-Policy-Guide-Spanish-20180201.pdf>.
- [18] “Road Lighting Calculations,” 2000. [Online]. Available: <http://www.cie.co.at/>
- [19] *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses*. Commission internationale de l’éclairage, 2004.
- [20] “Guide the maintenance of outdoor lighting systems,” 2003.
- [21] *Guide on the maintenance of indoor electric lighting systems*. International Commission on Illumination, 2005.
- [22] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables República del Ecuador, “Regulación Nro. ARCERNNR-007/2023,” 2023. [Online]. Available: [www.controlrecursosyenergia.gob.ec](http://www.controlrecursosyenergia.gob.ec)
- [23] T. Popławski and M. Kurkowski, “Nonlinear Loads in Lighting Installations—Problems and Threats,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 16, p. 6024, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16166024.
- [24] Sylvania, “Guía Técnica de Iluminación.”
- [25] D. Committee of the IEEE Power and E. Society, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality IEEE Power & Energy Society,” 2009.
- [26] J. L. Strack *et al.*, “Impact of Efficient Residential Lighting on Power Quality of a Distribution Network,” 2014. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/485>
- [27] Agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables, “ARCERNNR-006/20,” Dec. 2020.
- [28] I. Omar and M.-C. E. Roberto -Manzano, “The road lighting maintenance schedule and the impact in their energy efficiency APLICACIONES INDUSTRIALES,” 2011.
- [29] Agencia de regulación y control de energía y recursos no renovables, “ARCERNNR-00220,” Nov. 2020, Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available:

<https://controlelectrico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/ARCERNNR-00220.pdf>

- [30] ARCERNNR, “ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DEL COSTO DEL SERVICIO DE ALUMBRADO PÚBLICO GENERAL,” 2023.
- [31] P. I. Penafort, J. Elflein, L. S. Vailshery, V. Lupo, A. Puri-Mirza, and J. Cherowbrier, “Evolución anual de la tasa de inflación en Ecuador desde 2015 hasta 2029,” Alemania, Nov. 2024.

## 9. ANEXO

Anexo 1. Costos unitarios para desmontaje de luminaria sodio de 100 W.

ANEXO						
ÍTEM						
DESMONTAJE LUM.NA 100 W EN POSTE AUTOC. POT CTE CER						
Costos unitarios por actividad						
HORA/UNIDAD (A)		0,56		UNIDAD	U	
P E R S O N A L	TRABAJADOR	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E=(B)*(C)*(D))	
	Jefe de Grupo	1	4,65	50%	\$ 2,33	
	Liniero	1	4,65	100%	\$ 4,65	
	Ayudante Liniero	1	4,19	100%	\$ 4,19	
	Peón	0	4,14	0%	\$ -	
	Chofer Grúa	0	6,08	0%	\$ -	
	Chofer vehículo liviano	1	6,02	20%	\$ 1,20	
	Costo mano de obra (F)					\$ 12,37
	Costo unitario mano de obra (G)=(F)*(A)					\$ 6,93
E Q U I P O	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E=(B)*(C)*(D))	
	Camioneta (1 toneladas)	1	9,63	20%	\$ 1,93	
	Herramienta menor (C)*(G) [5% M.O]	1		5%	\$ 0,62	
	Costo equipos (H)					\$ 2,54
	Costo unitario herramientas (I)=(H)*(A)					\$ 1,42
COSTO UNITARIO					\$ 8,35	
INDIRECTOS				10,00%	\$ 0,84	
UTILIDAD				10,00%	\$ 0,84	
COSTO UNITARIO TOTAL					\$ 10,02	

Anexo 2. Costos unitarios para desmontaje de luminaria sodio de 250 W.

ANEXO						
ÍTEM						
DESMONTAJE LUM.NA 250 W EN POSTE AUTOCL. POT CTE CER						
Costos unitarios por actividad						
HORA/UNIDAD (A)		0,56	UNIDAD		U	
TRABAJADOR	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E)=(B)*(C)*(D)		
<b>P E R S O N A L</b>	Jefe de Grupo	1	4,65	50%	\$ 2,33	
	Liniero	1	4,65	100%	\$ 4,65	
	Ayudante Liniero	1	4,19	100%	\$ 4,19	
	Peón	0	4,14	0%	\$ -	
	Chofer Grúa	0	6,08	0%	\$ -	
	Chofer vehículo liviano	1	6,02	20%	\$ 1,20	
	Costo mano de obra (F)					\$ 12,37
	<b>Costo unitario mano de obra (G)=(F)*(A)</b>					<b>\$ 6,93</b>
<b>E Q U I P O</b>	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E)=(B)*(C)*(D)	
	Camioneta (1 toneladas)	1	9,63	20%	\$ 1,93	
	Herramienta menor (C)*(G) [5% M.O]	1		5%	\$ 0,62	
	Costo equipos (H)					\$ 2,54
	<b>Costo unitario herramientas (I)=(H)*(A)</b>					<b>\$ 1,42</b>
<b>COSTO UNITARIO</b>					<b>\$ 8,35</b>	
<b>INDIRECTOS</b>				10,00%	\$ 0,84	
<b>UTILIDAD</b>				10,00%	\$ 0,84	
<b>COSTO UNITARIO TOTAL</b>					<b>\$ 10,02</b>	

Anexo 3. Costos unitarios para desmontaje de luminaria sodio de 150 W.

ANEXO						
ÍTEM						
DESMONTAJE LUM.NA 150 W EN POSTE AUTOCL. DOB POT CER						
Costos unitarios por actividad						
HORA/UNIDAD (A)		0,56	UNIDAD		U	
TRABAJADOR	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E)=(B)*(C)*(D)		
<b>P E R S O N A L</b>	Jefe de Grupo	1	4,65	50%	\$ 2,33	
	Liniero	1	4,65	100%	\$ 4,65	
	Ayudante Liniero	1	4,19	100%	\$ 4,19	
	Peón	0	4,14	0%	\$ -	
	Chofer Grúa	0	6,08	0%	\$ -	
	Chofer vehículo liviano	1	6,02	20%	\$ 1,20	
	Costo mano de obra (F)					\$ 12,37
	<b>Costo unitario mano de obra (G)=(F)*(A)</b>					<b>\$ 6,93</b>
<b>E Q U I P O</b>	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E)=(B)*(C)*(D)	
	Camioneta (1 toneladas)	1	9,63	20%	\$ 1,93	
	Herramienta menor (C)*(G) [5% M.O]	1		5%	\$ 0,62	
	Costo equipos (H)					\$ 2,54
	<b>Costo unitario herramientas (I)=(H)*(A)</b>					<b>\$ 1,42</b>
<b>COSTO UNITARIO</b>					<b>\$ 8,35</b>	
<b>INDIRECTOS</b>				10,00%	\$ 0,84	
<b>UTILIDAD</b>				10,00%	\$ 0,84	
<b>COSTO UNITARIO TOTAL</b>					<b>\$ 10,02</b>	

## Anexo 4. Costos unitarios para desmontaje de luminaria sodio de 400 W.

ANEXO						
ÍTEM						
DESMONTAJE LUM.NA 400 W EN POSTE AUTOC. POT CTE CER						
Costos unitarios por actividad						
HORA/UNIDAD (A)		0,56	UNIDAD		U	
P E R S O N A L	TRABAJADOR	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E)=(B)*(C)*(D)	
	Jefe de Grupo	1	4,65	50%	\$ 2,33	
	Liniero	1	4,65	100%	\$ 4,65	
	Ayudante Liniero	1	4,19	100%	\$ 4,19	
	Peón	0	4,14	0%	\$ -	
	Chofer Grúa	0	6,08	0%	\$ -	
	Chofer vehículo liviano	1	6,02	20%	\$ 1,20	
	Costo mano de obra (F)					\$ 12,37
	<b>Costo unitario mano de obra (G)=(F)*(A)</b>					<b>\$ 6,93</b>
E Q U I P O	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (B)	COSTO HORA (C)	% PARTICIPACION (D)	COSTO (E)=(B)*(C)*(D)	
	Camioneta (1 toneladas)	1	9,63	20%	\$ 1,93	
	Herramienta menor (C)*(G) [5% M.O]	1		5%	\$ 0,62	
	Costo equipos (H)					\$ 2,54
	<b>Costo unitario herramientas (I)=(H)*(A)</b>					<b>\$ 1,42</b>
<b>COSTO UNITARIO</b>					<b>\$ 8,35</b>	
<b>INDIRECTOS</b>				10,00%	\$ 0,84	
<b>UTILIDAD</b>				10,00%	\$ 0,84	
<b>COSTO UNITARIO TOTAL</b>					<b>\$ 10,02</b>	

## Anexo 5. Costos unitarios para montaje de luminarias LED.

**ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS**UNIDAD  
: U

DETALLE : MONTAJE DE LUMINARIA

ESPECIFICACIONES: Incluye instalación de luminaria

<b>EQUIPO DESCRIPCION</b>	<b>CANTIDAD A</b>	<b>TARIFA B</b>	<b>COSTO HORA C=AxB</b>	<b>RENDIMIE NTO R</b>	<b>COSTO D=CxR</b>
Herramienta Menor 2% de M.O.					0,38
<b>SUBTOTAL M</b>					<b>0,38</b>

<b>MANO DE OBRA DESCRIPCION</b>	<b>CANTIDAD A</b>	<b>JORNAL/H R B</b>	<b>COSTO HORA C=AxB</b>	<b>RENDIMIE NTO R</b>	<b>COSTO D=CxR</b>
TÉCNICO ELÉCTRICO LINIERO EO D2	0,50	4,10	2,05	1,200	2,46
PEON EO E2	0,50	4,05	2,03	1,200	2,43
CHOFER CH C3	0,50	5,76	2,88	0,300	0,86
<b>SUBTOTAL N</b>					<b>5,75</b>

<b>MATERIALES DESCRIPCION</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDA D A</b>	<b>PRECIO UNIT. B</b>	<b>COSTO C=AxB</b>
LUMINARIA DE LED 150 W	U	1,000	150,00	150,00
<b>SUBTOTAL O</b>				<b>150,00</b>

<b>TRANSPORTE DESCRIPCION</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDA D A</b>	<b>TARIFA B</b>	<b>COSTO C=AxB</b>
LUMINARIA DE LED 150 W	U	1,000	0,00	0,00
<b>SUBTOTAL P</b>				<b>0,00</b>

<b>TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)</b>	156,13
<b>INDIRECTOS (%)</b>	18,00%
<b>UTILIDAD (%)</b>	0,00%
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>	184,24
<b>VALOR OFERTADO</b>	<b>184,24</b>

**SON:** CIENTO OCHENTA Y CUATRO DOLARES CON  
24/100 CENTAVOS  
**ESTOS PRECIOS NO  
INCLUYEN IVA**

## Anexo 6. Flujo económico.

AÑO	FLUJO ECONOMICO ESCENARIO 2	FLUJO ECONOMICO ESCENARIO 3
1	47550,04	161798,67
2	165843,63	165843,63
3	169989,72	169989,72
4	174239,47	174239,47
5	178595,45	178595,45
6	183060,34	183060,34
7	187636,85	187636,85
8	192327,77	192327,77
9	197135,97	197135,97
10	202064,36	202064,36