



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS PRODUCIDOS POR LA
ILUMINACIÓN DE TECNOLOGÍA LED EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: RICARDO MATEO FLORES MONTESDEOCA
CHRISTIAN FABRICIO HUIRACOCCHA SANGURIMA
TUTOR: ING. FREDDY FERNANDO CAMPOVERDE ARMIJOS, Mgr.

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Ricardo Mateo Flores Montesdeoca con documento de identificación N° 0104479381 y Christian Fabricio Huiracocha Sangurima con documento de identificación N° 0105764898; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 1 de noviembre del 2023

Atentamente,



Ricardo Mateo Flores Montesdeoca

0104479381



Christian Fabricio Huiracocha Sangurima

0105764898

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Ricardo Mateo Flores Montesdeoca con documento de identificación N° 0104479381 y Christian Fabricio Huiracocha Sangurima con documento de identificación N° 0105764898, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Estudio de perturbaciones eléctricas producidos por la iluminación de tecnología LED en una red de distribución”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 1 de noviembre del 2023

Atentamente,



Ricardo Mateo Flores Montesdeoca

0104479381



Christian Fabricio Huiracocha Sangurima

0105764898

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Fernando Campoverde Armijos con documento de identificación N° 0102339470, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS PRODUCIDOS POR LA ILUMINACIÓN DE TECNOLOGÍA LED EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN, realizado por Ricardo Mateo Flores Montesdeoca con documento de identificación N° 0104479381 y Christian Fabricio Huiracocha Sangurima con documento de identificación N° 0105764898, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 1 de noviembre del 2023

Atentamente,



Ing. Freddy Fernando Campoverde Armijos, Mgtr.

0102339470

RESUMEN

Esta tesis trata sobre el estudio de las perturbaciones producidas por la iluminación de tipo LED en una red de alumbrado público las cuales han sido el reemplazo por las luminarias de tipo sodio. Se utilizará una metodología cuantitativa para conseguir una mejor interpretación de las distorsiones producidas. Mediante el empleo del analizador de calidad de energía (Fluke 435-II), se realizará las correspondientes mediciones y después analizar las perturbaciones generadas tanto por las luminarias tipo sodio y tipo LED. Este analizador de calidad nos mostrara los distintos datos como, (THDI) valor de distorsión total armónica de corriente, (THDV) valor de distorsión armónica de voltaje, además de fluctuaciones y depresiones de voltaje, así también si se alimentan con una fuente pura con el uso de una fuente de alimentación programable Chroma el cual permite realizar simulaciones de armónicos, flickers y sags, para así realizar un respectivo análisis y comparación de resultados medidos y simulados, verificando si los datos medidos tanto en fuente fija como variable cumplen con la regulación vigente relacionada a calidad de energía. Por último, se realiza simulaciones de parámetros lumínicos de cada tipo de luminaria con el objetivo de verificar si los datos de medición como luminancia e iluminancia cumplen con la regulación respecto a alumbrado público general. Teniendo así una idea más clara de los parámetros de distorsión eléctrica producida por la luminaria LED en comparación con la de sodio y cuál de estos dos tipos de luminarias pueden afectar más a la calidad de energía de la red de distribución.

Palabras clave: luminarias, perturbaciones, red eléctrica, armónicos, flickers, sags, alumbrado público, dialux.

ÍNDICE

RESUMEN	VI
1 INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Delimitación	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Justificación	2
1.5 Estado del Arte	3
2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 Luminarias	7
2.1.1 Elementos de la luminaria	7
2.1.2 Luminarias de tipo sodio	8
2.1.3 Luminarias de tipo LED	9
2.2 Calidad de Energía	10
2.2.1 Distorsión Armónica	10
2.2.2 Depresión de tensión (SAG)	12
2.2.3 Fluctuaciones de tensión (FLICKER)	13
2.3 Normas vigentes respecto a la calidad de energía eléctrica	14
2.3.1 Normas Aplicadas a la distorsión armónica	15
2.3.2 Normas Aplicadas a fluctuaciones de tensión.	17
2.3.3 Normas Aplicadas a la depresión de tensión	18
2.4 Iluminación	21
2.4.1 Conceptos luminotécnicos	21
2.4.2 Alumbrado Público General	23
2.4.2.1 Normativa Vigente	23
2.5 Software DIALux®	26
2.6 Equipos	27
2.6.1 Analizador de redes Fluke 435 II	27
2.6.2 Fuente programable CHROMA 61702	28

2.6.3	Luxómetro AMPROBE LM-120	29
2.6.4	Luminancímetro Mavo Spot 2	30
2.6.5	Distanciómetro FLUKE 416D	31
3	METODOLOGÍA	32
3.1	Ensayo en laboratorio	32
3.1.1	Selección de luminarias	32
3.1.2	Circuito de ensayo	33
3.1.3	Equipo de medida	34
3.1.4	Lectura de datos	35
3.2	Procedimiento de medición de perturbaciones eléctricas	35
3.2.1	Distorsión Armónica	35
3.2.1.1	Medición de la Distorsión Armónica	36
3.2.2	Medición de fluctuación de tensión (Flicker)	37
3.2.2.1	Medición de flickers con fuente fija.	38
3.2.2.2	Medición de flickers con fuente programable Chroma	38
3.2.3	Medición de la depresión de tensión (Sag)	39
3.2.3.1	Configuración del Fluke 435-II para Sags	40
3.3	Procedimiento de medición de parámetros lumínicos	40
3.3.1	Medición de iluminancia	41
3.3.2	Medición de luminancia	46
3.3.3	Simulaciones en Dialux	48
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
4.1	Ensayo en laboratorio	49
4.1.1	Luminarias seleccionadas	49
4.1.2	Conexión del circuito de ensayo	50
4.1.3	Configuración inicial de equipo de medida	51
4.2	Análisis de perturbaciones eléctricas	52
4.2.1	Análisis de armónicos	52
4.2.1.1	Análisis de armónicos con fuente fija	52
4.2.1.2	Análisis de armónicos con fuente variable CHROMA	61
4.2.2	Análisis de Flickers	70
4.2.2.1	Análisis de Flickers con fuente fija	70
4.2.2.2	Análisis de Flickers con fuente variable Chroma	72
4.2.3	Análisis de Sags	78
4.2.3.1	Simulación de caídas de tensión con fuente variable Chroma	78
4.3	Diseño de iluminación vial	81
4.3.0.1	Cálculos y medición de parámetros lumínicos	81

4.3.0.1.1	Cálculo de interdistancia por medio del factor de utilización	81
4.3.0.1.2	Medición de parámetros lumínicos por el método de los nueve puntos.	84
4.3.0.2	Simulaciones de parámetros lumínicos	90
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
5.1	Conclusiones	93
5.2	Recomendaciones	97
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
	ANEXOS	101
ANEXO 1	. . . . .	102
ANEXO 2	. . . . .	104
ANEXO 3	. . . . .	106
ANEXO 4	. . . . .	109
ANEXO 5	. . . . .	110
ANEXO 6	. . . . .	112
ANEXO 7	. . . . .	114
ANEXO 8	. . . . .	115
ANEXO 9	. . . . .	116
ANEXO 10	. . . . .	118
ANEXO 11	. . . . .	120
ANEXO 12	. . . . .	121
ANEXO 13	. . . . .	123
ANEXO 14	. . . . .	126
ANEXO 15	. . . . .	129
ANEXO 16	. . . . .	135

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Circuito de arranque de una luminaria de tipo sodio [Autores].	8
2.2	Esquema de arranque luminaria LED [Autores].	9
2.3	Ejemplo forma de onda con distorsión. [Autores]	10
2.4	Ejemplo de onda de un SAGs.	12
2.5	Ejemplo de onda de un FLICKER.	14
2.6	Iluminancia. [Autores]	21
2.7	Intensidad Luminosa. [Autores]	22
2.8	Luminancia. [Autores]	22
2.9	Analizador de redes trifásico FLUKE 435	27
2.10	Fuente variable AC [Autores]	29
2.11	Luxómetro marca AMPROBE LM-120 [Autores]	30
2.12	Luminancímetro Mavo Spot 2 [Autores]	30
2.13	Distanciómetro FLUKE 416D [Autores]	31
3.1	Esquema de prueba para medir diferentes perturbaciones eléctricas.[Autores]	34
3.2	Pruebas en el laboratorio. [Fuente: Autores]	35
3.3	Medición de armónicos con fuente fija [Fuente: Autores]	37
3.4	Medición de armónicos con fuente variable AC [Fuente: Autores] . . .	37
3.5	Pantalla de menú con selección de modo (Flicker).	38
3.6	Pantalla de la forma de onda con presencia de flicker [Fuente: Autores]	39
3.7	Pasos para medir Fluctuaciones en el equipo.	40
3.8	Implantación Unilateral. [Autores]	41
3.9	Función cociente (A/H).[Autores]	44
3.10	Distribución y medidas aplicando método de nueve puntos.[Autores] .	45
3.11	Malla de medición iluminancia y luminancia.[Autores]	47
3.12	Luminarias usadas para simular en <i>DIALux evo</i> .[Autores]	48
4.1	Luminaria Marca 1 de 150W [Fuente: Autores.]	50
4.2	Luminaria Marca 2 de 100W [Fuente: Autores.]	50
4.3	Comprobación de encendido Luminaria Marca 1 de 150W [Fuente: Autores.]	51

4.4	Comprobación de encendido Luminaria Marca 2 de 100W [Fuente: Autores.]	51
4.5	THD y orden de armónicos de luminaria LED en fuente fija.	53
4.6	THD y orden de armónicos de luminaria sodio en fuente fija.	54
4.7	Diferencia del THD y armónicos en luminaria sodio-LED con fuente fija.	56
4.8	Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de una luminaria encendida con fuente fija (NA-LED).	57
4.9	Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de dos luminarias encendidas con fuente fija (NA-LED).	59
4.10	Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de 3 luminarias encendidas con fuente fija (NA-LED).	60
4.11	THD y orden de armónicos de luminaria LED con fuente chroma.	62
4.12	THDv, THDi, orden de armónicos de luminaria de sodio con fuente chroma	63
4.13	Diferencia del THD y armónicos en luminaria sodio-LED con fuente variable Chroma	65
4.14	Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de una luminaria encendida con fuente Chroma (NA-LED).	67
4.15	Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de dos luminarias encendidas con fuente Chroma (NA-LED).	68
4.16	Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de 3 luminarias encendidas con fuente Chroma (NA-LED).	69
4.17	Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente fija en 3 casos de encendido.	71
4.18	Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente fija.	72
4.19	Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente variable Chroma en 3 casos de encendido.	73
4.20	Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente variable Chroma.	74
4.21	Severidad de flicker entre fuente fija y fuente variable Chroma.	75
4.22	Curva de severidad de flicker (Pst_{1min}) de 1 luminaria encendida con fuente fija.	76
4.23	Curva de severidad de flicker (Pst_{1min}) de 2 luminarias encendidas con fuente fija.	77
4.24	Curva de severidad de flicker (Pst_{1min}) de 3 luminarias encendidas con fuente fija.	77
4.25	Comparación de duración de la depresión de tensión entre sodio y LED.	80
4.26	Vía junto a planta solar fotovoltaica de la UPS.[Fuente: Autores.]	81

4.27	Montaje de luminarias tipo sodio.[Fuente: Autores.]	83
4.28	Montaje de luminarias tipo LED.[Fuente: Autores.]	84
4.29	Mediciones fotométricas por método de los 9 puntos en la vía junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (150W- Na). [Autores]	85
4.30	Mediciones fotométricas por método de los 9 puntos en la vía junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (100- LED). [Autores]	86
4.31	Mediciones fotométricas por el método de malla total en la vía junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (150W- Na). [Autores]	88
4.32	Mediciones fotométricas por el metodo de malla total en la vía junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (100- LED). [Autores]	89
4.33	Simulación de iluminación vial [Elaboración propia, obtenido de <i>DIALux evo.</i>]	90
5.1	Histograma de armónicos al encender tres luminarias de sodio en fuente fija obtenido de <i>Power Log Classic.</i>	105
5.2	Histograma de armónicos al encender tres luminarias de LED en fuente fija obtenido de <i>Power Log Classic.</i>	105
5.3	Pantalla principal de <i>SoftPanel</i> [FUENTE: Software SoftPanel].	109
5.4	Detalle forma de onda con distorsión armónica. [FUENTE: Software SoftPanel].	109
5.5	Histograma de armónicos al encender dos luminarias de sodio en fuente variable Chroma obtenido de <i>Power Log Classic.</i>	113
5.6	Histograma de armónicos al encender dos luminarias de LED en fuente variable Chroma obtenido de <i>Power Log Classic.</i>	113
5.7	Pantalla List Mode para programación de Flickers. [FUENTE: <i>SoftPanel</i>]	117
5.8	Pantalla List Mode para programacion de depresiones de voltaje. [FUENTE: <i>SoftPanel</i>]	122
5.9	Detalle del voltaje de las líneas con la presencia de depresiones de voltaje en luminaria LED. [FUENTE: <i>Software Power Log Classic.</i>]	124
5.10	Detalle del voltaje de las líneas con la presencia de depresiones de voltaje en luminaria sodio. [FUENTE: <i>Software Power Log Classic.</i>]	125
5.11	Ficha del producto: LUMINARIA LEDVANCE- LED PERFORNANCE	129
5.12	Resultado de planificación: LUMINARIA LEDVANCE- LED PERFORNANCE	130
5.13	Resumen de resultados: LUMINARIA LEDVANCE- LED PERFORNANCE	131

5.14	Tabla de intensidad lumínica : LUMINARIA LEDVANCE- LED PERFONMANCE	131
5.15	Tabla de intensidad lumínica : LUMINARIA LEDVANCE- LED PERFONMANCE	131
5.16	Ficha del producto: LUMINARIA LEIPZIGER- LEUCHTEN GMBH	132
5.17	Resultado de planificación: LUMINARIA LEIPZIGER- LEUCHTEN GMBH	133
5.18	Resumen de resultados: LUMINARIA LEIPZIGER- LEUCHTEN GMBH	134
5.19	Tabla de intensidad lumínica : LUMINARIA LEIPZIGER- LEUCHTEN GMBH	134
5.20	Tabla de intensidad lumínica : LUMINARIA LEIPZIGER- LEUCHTEN GMBH	134
5.21	Conexión de luminarias a la fuente de alimentación fija. [Autores]	135
5.22	Calibración de equipo de medida Fluke 435-II. [Autores]	135
5.23	Programación de simulación en fuente variable Chroma [Autores]	136
5.24	Montaje de luminarias en poste para medición de parámetros lumínicos. [Autores]	136
5.25	Medición de iluminancia con Luxómetro [Autores]	137
5.26	Medición de luminancia con Luminancímetro. [Autores]	137

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Desarrollo de la iluminación a lo largo del tiempo y su eficacia.	3
2.1	Probabilidad de ocurrencia de SAGs de acuerdo a la causa	13
2.2	Límites para equipos de Clase C	16
2.3	Límites de distorsión de tensión	16
2.4	Límites máximos de armónicos de voltaje (% de voltaje nominal) . . .	17
2.5	Niveles de planificación para P_{st} y P_{lt} en sistemas de potencia MV, HV y EHV.	17
2.6	Niveles de compatibilidad de P_{st} y P_{lt} en BV y MV	18
2.7	Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos del sistema eléctrico.	19
2.8	Requisitos del voltaje de suministro.	20
2.9	Valores de las tensiones armónicas individuales en los terminales de entrada para órdenes de hasta 25.	20
2.10	Clases de alumbrado para diferentes tipos de vías públicas	23
2.11	Luminancia de calzada para tráfico motorizado.	24
2.12	Valores mínimos de iluminancia promedio (lux) en vías motorizadas. . .	25
2.13	Características de la superficie.	25
2.14	Clases de iluminación para diferentes tipos de vías en áreas peatonales y de ciclistas	26
2.15	Características de la superficie.	26
2.16	Especificaciones técnicas FLUKE 435.	28
3.1	Características de luminarias.	32
3.2	Relación F/E aproximados para diferentes fuentes de luz	33
3.3	Estándares que cumple el analizador FLUKE 435 II	34
3.4	Clasificación y tipo de vía.	42
3.5	Clase de alumbrado para vía tipo D	42
3.6	Series CE de clase de alumbrado para vía tipo D	43
3.7	Altura de montaje según flujo de luminaria	43
3.8	Valores de (f_m) según característica de vía	43
3.9	Medidas de distribución de los nueve puntos.	45
3.10	Medidas de distribución de puntos para cálculo de luminancia	47

4.1	Magnitudes armónicas (%) de luminaria LED con fuente fija.	52
4.2	Magnitudes armónicas (%) de luminaria LED y límites de norma. . .	53
4.3	Magnitudes armónicas (%) de luminaria sodio con fuente fija.	54
4.4	Magnitudes armónicas (%) de luminaria sodio y límites de norma. . .	55
4.5	Valores de programación para la simulación de armónicos.	61
4.6	Magnitudes armónicas (%) de luminaria LED con fuente Chroma. . .	61
4.7	Magnitudes armónicas (%) y límites de norma con fuente Chroma de luminaria LED.	62
4.8	Datos de armónicos de luminaria sodio con fuente fija	63
4.9	Magnitudes armónicas (%) y límites de norma con fuente Chroma de luminaria sodio	64
4.10	Sumatoria de porcentaje armónico en cada tipo de fuente para luminaria sodio y LED.	65
4.11	Severidad de flicker de luminarias con fuente fija.	70
4.12	Valores de entrada para la programación del flicker.	72
4.13	Severidad de flicker de luminarias con fuente variable Chroma.	73
4.14	Severidad de flicker de luminarias con fuente fija y variable.	75
4.15	Valores para la simulación de la depresión de tensión	78
4.16	Clasificación de las depresiones de tensión de luminaria LED.	79
4.17	Clasificación de las depresiones de tensión de luminaria sodio.	79
4.18	Valores para cálculo de interdistancia.	83
4.19	Valores medidos de iluminancia y luminancia por el método de los 9 puntos.	84
4.20	Valores medidos de iluminancia y luminancia en malla total.	87
4.21	Parámetros de la vía para la simulación	90
4.22	Parámetros de la disposición de las luminarias	90
4.23	Características de la acera con tráfico peatonal	91
4.24	Resultados de evaluación en <i>DIALux evo</i>	91
4.25	Resultados de evaluación en <i>DIALux evo</i>	91
5.1	Datos de armónicos de entrada y salida para luminaria LED	102
5.2	Datos de armónicos de entrada y salida para luminaria de sodio . . .	103
5.3	Datos de armónicos SODIO-LED en tres casos de encendido con fuente fija	104
5.4	Armónicos de voltaje y corriente de una luminaria LED en fuente fija.	106
5.5	Datos de armónicos de entrada y salida para luminaria LED (Fuente Chroma)	110
5.6	Datos de armónicos de entrada y salida para luminaria de sodio (Fuente Chroma)	111

5.7	Datos de armónicos SODIO-LED en tres casos de encendido con fuente Chroma	112
5.8	Datos comparativos de armónicos entre fuente fija y fuente variable Chroma	114
5.9	Armónicos de voltaje y corriente de una luminaria LED en fuente variable Chroma	115
5.10	Datos de Flickers de luminaria LED	116
5.11	Datos de Flickers de luminaria de sodio	117
5.12	Datos de flickers sodio-LED en tres casos de encendido con fuente fija	118
5.13	Datos de flickers sodio-LED en tres casos de encendido con fuente variable Chroma	119
5.14	Valores de Flickers en luminaria LED.	120
5.15	Valores medidos de iluminancia y luminancia de luminarias encendidas (LED y Sodio) por el método de los nueve puntos.	126
5.16	Valores medidos de iluminancia y luminancia de luminarias apagadas (LED y Sodio) por el método de los nueve puntos.	126
5.17	Valores medidos con luminarias apagadas (SODIO - LED) en malla completa.	127
5.18	Valores medidos con luminarias encendidas (SODIO - LED) en malla completa.	128

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Planteamiento del problema

El uso generalizado de luminarias de sodio presenta distintas perturbaciones en la red eléctrica como consecuencia de sus componentes electrónicos que la conforman. La presencia de estos fenómenos puede provocar dificultades en los sistemas eléctricos, ya que pueden generar un aumento en la temperatura del cableado, pérdidas sufridas por el transformador, alteración en el flujo luminoso y daños a equipos eléctricos.

1.2 Delimitación

Durante el periodo de diciembre de 2022 y enero 2023 se evaluaron los parámetros de perturbaciones eléctricas para tres luminarias tipo sodio y tipo LED.

Las mediciones del flujo luminoso de los dos tipos de luminaria se realizó en la zona de parqueo junto a la planta de energía solar fotovoltaica, la cual se encuentra entre la parte posterior del edificio Mario Rizzini y el estadio Valeriano Gavinelli, del mismo modo las evaluaciones de las distintas perturbaciones que se analizaron fueron realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas de la CARRERA DE ELECTRICIDAD ubicado en el edificio Cornelio Merchán de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Realizar la comparación de las normativas nacionales e internacionales pertinentes a las distintas perturbaciones que se presentan en la red de distribución generadas por las luminarias de tipo sodio y tipo LED, a través de simulaciones y mediciones, realizando un estudio comparativo de los resultados obtenidos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar las perturbaciones producidas por el empleo de luminarias de tipo sodio y tipo LED.
- Realizar un modelo de simulación en base a las mediciones realizadas de la red de alumbrado público con los dos tipos de tecnología.
- Comparar los resultados de flujo luminoso reales producidos por una luminaria de tipo sodio y tipo LED, en balance a los valores de los lúmenes simulados y medidos.

1.4 Justificación

Este estudio analizara la utilidad de los valores de generación (ARMÓNICA), depresión de tensión (SAG) y fluctuación de tensión (FLICKER) que introducen en el sistema eléctrico, las luminarias tipo sodio y tipo LED. Además, comparar los niveles de perturbación de cada tipo de luminaria y verificar que luminaria presenta más perturbación eléctrica. Al realizar las simulaciones respectivas de cada luminaria de los parámetros lumínicos, estos deben estar dentro de lo que indica la regulación vigente.

1.5 Estado del Arte

La iluminación eléctrica ha tenido muchos avances desde que Tomas Alva Edison patentó la bombilla incandescente en 1879 en los Estados Unidos [1].

A medida que pasa el tiempo, las tecnologías siguen desarrollándose y aparecen nuevas fuentes de luz. Cada de una de estas luminarias han representado beneficios con respecto a la bombilla incandescente [2].

Tabla 1.1: Desarrollo de la iluminación a lo largo del tiempo y su eficacia.

Tecnología	Año de Invención	Vida Útil (Horas)	Eficiencia (Lm/W)
Incandescente	1878	1000	15
Fluorescente	1930	8000	107
Halógena	1959	2000	24
CFL	1970	10.000	63
LED	1990	100.000	303

Fuente: Marty Cole y Tim Driscoll [2]

Como se puede observar en la Tabla 1.1, la luminaria de tipo LED tiene la mayor eficiencia y mejoran cada día, de ahí que su implementación en los diferentes sectores sean a gran escala dominando el mercado en la actualidad, pero con la presencia de cargas no lineales.

Según los autores Franco, Vega & Ramirez (2017), las cargas no lineales tales como rectificadores, inversores y diodos, distorsionan la forma de onda de la corriente, lo que provoca caídas de tensión no sinusoidales, favoreciendo así la aparición de distorsión armónica [3]. El caso particular de las luminarias LED también ocasionan distorsión armónica debido a los diodos emisores del espectro luminoso visible.

En un estudio realizado por Uddin, Shareef, Mohamed, & Hannan (2012) deducen que la desviación de la forma de onda de una función sinusoidal se expresa generalmente en términos de distorsión armónica de la corriente y tensión, lo que afecta al rendimiento de los transformadores y alimentadores debido al aumento de pérdidas [4].

Por lo que se han desarrollado investigaciones con respecto a la distorsión armónica con el uso de equipos especializados para medir este parámetro eléctrico. Como el trabajo realizado por estudiantes de la UPS sede Guayaquil que utilizaron un analizador de redes marca Fluke para medir armónicos producidos en las luminarias sodio y LED

en una edificación de la Universidad, al comparar los valores concluyen que las 2 tecnologías presentan armónicos tanto de tensión como de corriente, además con los datos de flujo luminoso determinaron que el espacio analizado no cumple con índices de iluminación correctas para un ambiente de estudio [5].

Así también estudiantes de la UPS sede Cuenca proponen el “Análisis del efecto que producen los armónicos en la red eléctrica generados por distintas cargas lumínicas tipo led usados para interiores” [6], el cual tiene como objetivo estudiar los niveles de iluminación para luminarias LED de uso residencial de similares características pero con diferentes cargas en el que para el cumplimiento del objetivo se realiza simulaciones para comparar el THD que presenta cada en forma individual y en conjunto. En el que se determinó que el tercer armónico es el que más influye para la distorsión de la onda sinusoidal de la red eléctrica, y al conectar luminarias de distintas marcas se tuvo una reducción de armónicos medidos en el PCC.

Brusil (2020) en su trabajo de investigación concluye que en proyectos actuales la tecnología LED ha ido rápidamente reemplazando a otras fuentes de iluminación ya que estas luminarias tienen amplias ventajas como el ahorro energético y baja emisión de calor [7], teniendo en cuenta los efectos negativos en la calidad de energía debido a introducción de la gran cantidad de distorsiones armónicas en las red eléctrica [8]. Además, se produce el aumento de pérdidas en bobinados por efecto Joule [9], así como interferencias de comunicaciones, recalentamiento de equipos y sobrecarga en los conductores [10].

Por esta razón, las emisiones armónicas provocadas por las luminarias que utilizan tecnología LED y sus efectos en las redes de distribución aún no se han estudiado completamente, por lo que en un estudio realizado por Andrade & Flores (2019), utilizan el software de simulación EASY POWER para estimar quebranto de potencia, caídas de tensión y flujos de carga y potencia del sistema del alumbrado general eléctrico comparando entre luminarias de 110V de sodio y LED que están instalados en una avenida de la ciudad de Ambato [11]. Se encontró que las luminarias LED cumplen con los rangos indicados en la normativa CONELEC 008/11 a diferencia de la luminaria de sodio que el THD de tensión alrededor de 8.50%, lo cual está fuera del límite implantado por la norma y existe desbalances de tensión y una sobrecarga de conductores en luminarias de sodio.

La perturbación eléctrica que comúnmente es analizada es el armónico, dejando a un lado las fluctuaciones de tensión que también están presentes en luminarias ya sea de uso residencial o en una red de alumbrado público. Bastidas (2021),

planteó una investigación acerca “Análisis de Perturbaciones Rápidas de Voltaje (Flicker) y su incidencia en el comportamiento operativo dentro del área de concesión de la Corporación Nacional de Electricidad Bolívar” [12], dicho trabajo evalúa las perturbaciones rápidas de tensión mediante el uso del Flickermeter para analizar la calidad de energía en la red eléctrica de CNEL EP Bolívar. En el cual se determinó que un transformador de distribución en mal estado o sin mantenimiento por parte de la empresa distribuidora estos presentan incumplimiento del índice de flicker sobre todo el valor de (Pst) que supera la unidad provocando el parpadeo muy notorio en elementos electrónicos y fuentes luminosas conectadas a esta red eléctrica además del constante crecimiento de la demanda de energía por la empresa distribuidora. Por otro lado, las depresiones de tensión presentes en luminarias no han tenido mucha relevancia en investigaciones en los últimos años por lo que el presente estudio se analiza esta disminución de luminosidad al existir caídas de tensión.

En el desarrollo de proyectos para el alumbrado público debe ir de la mano no solo del estudio de perturbaciones sino también del flujo luminoso, de forma que se puedan prevenir posibles riesgos por la baja intensidad luminosa de las luminarias instaladas en los postes. Laguna (2017), planteó una investigación acerca de la evaluación y riesgo lumínico en calzadas [13], para ello usan el equipo EXTECH HD 450, obteniendo datos de iluminancia y fichas de evaluación lumínica, dando como resultado que en zonas con luminaria tipo sodio existe mayor riesgos para accidentes de tránsito y peatonales por su ineficiente iluminación a la calzada por lo que es necesario cambiar por una luminaria de mayor potencia o si es solvente cambiar por una de tecnología LED que cumple con la mayoría de normativas actuales.

Otro estudio enfocado a alumbrado público es el presentado por Castro & Posligua (2015), en el cual su investigación se centra en la eficiencia energética, la distribución de la luz y el rendimiento visual de los LED en comparación con las luminarias de sodio, es por ello que en el proyecto de iluminación implementado con luminarias LED conforme en los conceptos de eficiencia energética y confort visual [14], los autores usan una estructura metálica y curvas de luz a partir de datos reales y simulados para comprender el comportamiento y la luminosidad de diferentes luminarias, dando como resultado que en un proyecto de alumbrado público la tecnología LED tiene una mejor eficiencia y fotometría además del ahorro energético, así también que las luminarias de sodio si su flujo luminoso disminuye al 70% de su capacidad es recomendable ser reemplazada por una de tipo LED por las ventajas de rendimiento luminoso, índice de reproducción cromática y sobre todo temperatura de color que genera un mejor campo de percepción para el ojo humano.

Para medir la iluminancia el método empleado por los autores del trabajo titulado “Aplicación de criterios de optimización energética y seguridad en la iluminación y confort, en calles y avenidas” [15], en la cual se marca la vía con una cuadrícula punteada en el suelo para poder realizar las mediciones de iluminancia el cual midieron a una altura de 0,05 m utilizando un luxómetro, un medidor láser y marcando los puntos con una tiza en una estimación de posición horizontal asegurando así un nivel plano de medición, teniendo como resultado que la relación de uniformidad es menor o igual a 0.5, además que la intensidad mínima de iluminación para caminos, calles y avenidas se debe también al mantenimiento de preventivo y correctivo de la red de alumbrado público.

Como recomendación al realizar trabajos relacionados a iluminación vial en el Ecuador para paso de transeúntes y carros (tipos de calzada), incluyendo también los proyectos de iluminación de escenarios deportivos ya sea en sectores urbanos o rurales, los proyectos actuales y futuros deben cumplir con la regulación Ecuatoriana vigente que es la Nro. ARCERNNR 006/20 [16].

Para reducir o mejorar los problemas mencionados anteriormente se ha introducido en el mercado eléctrico las luminarias de tipo LED. Por esta razón, en este proyecto se plantea analizar las distorsiones eléctricas, tanto de corriente como de tensión. Con los datos obtenidos en la medición se propone realizar una comparación del impacto de las perturbaciones que producen cada tipo de tecnología, que se pueden presentar al conectarse en la red de distribución. Así también una comparativa de las mediciones de parámetros lumínicos producidas por cada luminaria y simulaciones mediante Dialux.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Luminarias

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), nos dice que las luminarias "son instrumentos que emiten o convierten la luz emanada por lámparas las cuales cumplen normas y accesorios para su correcto funcionamiento" [17].

2.1.1 Elementos de la luminaria

Los diferentes componentes de cada tipo de luminaria dependen del modelo o el tipo de tecnología, pero por lo general los elementos más comunes que se puede encontrar son:

- Carcaza. - Es una pieza que resguarda y contiene los diferentes componentes eléctricos y mecánicos, y que está fabricada de aluminio o de un material resistente.
- Refractor. - Es el encargado de la distribución espacial del flujo luminoso ya que es de un material translúcido.
- Bombilla. - Encargada de transformar la energía eléctrica en luz.
- Balasto. - Componente electrónico que mantiene estable la intensidad de la lámpara y el funcionamiento correcto de la bombilla.
- Condensador. - Es el encargado de oponerse al cambio brusco de cargas eléctricas, además de proteger al circuito eléctrico de cargas o descargas que se pueden presentar en la tensión, utilizando así de una mejor manera la energía.

- Driver. - Debido a que los LED funcionan con corriente continua (CC) se necesita un dispositivo que transforme la energía de corriente alterna que llega desde la red eléctrica, además de una tensión adecuada para el correcto funcionamiento.
- Placa LED. - Parte de una luminaria tipo LED en donde se encuentran los respectivos LEDs los cuales emiten la luz para las distintas zonas de uso a iluminar.

2.1.2 Luminarias de tipo sodio

Tienen alta eficiencia, pero con un color de luz amarillo brillante, estas son usadas para iluminación tanto de interiores y exteriores como lo es el alumbrado público pero que actualmente con el pasar de los años se ha ido sustituyendo paulatinamente por luminarias de tipo LED. Las luminarias de sodio se clasifican en tipo SON y SON-H. Las de tipo SON tienen una ampolla exterior revestida interiormente con un polvo difuso y la de SON-H se caracteriza por ser de vidrio transparente y de forma tubular [18]. El componente primordial que posibilita el funcionamiento de las luminarias tipo sodio es el balasto o arrancador. Ver Figura 2.1

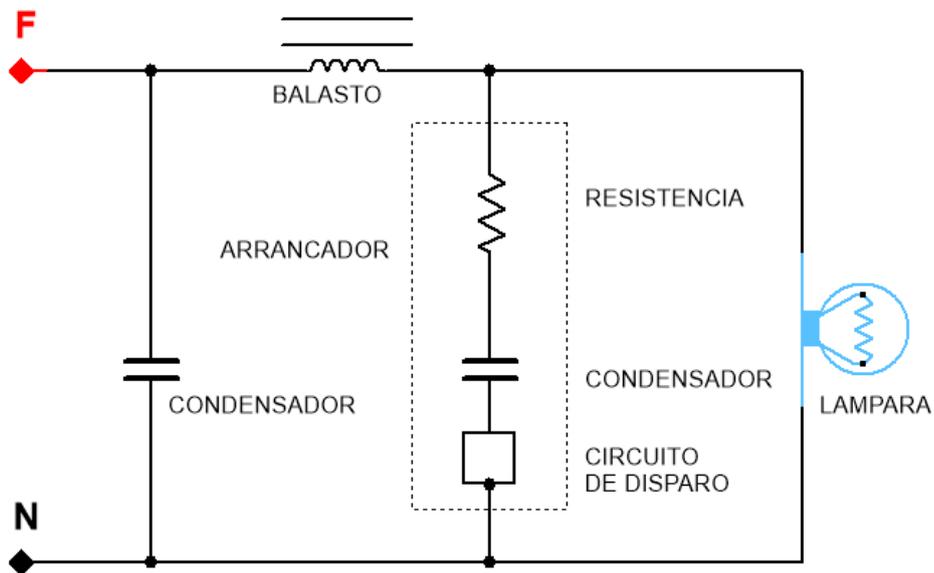


Figura 2.1: Circuito de arranque de una luminaria de tipo sodio [Autores].

El balasto es el encargado de encender la luminaria y de regular la frecuencia diferente a la tensión de alimentación, estos han sido analizados con mayor atención debido a sus consecuencias negativas en las red de distribución.

Observando que “Las luminarias de tipo Sodio que contienen balastro electrónico se basan en la la electrónica de potencia, operando a frecuencias muy altas, por lo que se obtiene armónicos de alta frecuencia” [19]. Además, el balastro electrónico con dificultad llega a una una productividad eficaz superior al 87 %, un factor de potencia menor a 0,6 y un THD sumamente alto ” [20].

2.1.3 Luminarias de tipo LED

Según Freire y Gago “En la actualidad se esta manejando tecnología dentro de las luminarias las cuales generan gran probabilidad en cuanto a los nuevos avances de la luz LED (diodos emisores de luz)” [21].

Las luminarias LED están formadas por grupos de diodos led, es decir que la luminaria de este tipo está conformada por un cierto numero de LEDs, esta valor va conjuntamente con la fuente luminosa comparando con luminarias de uso diario como las de tipo sodio [22].

Estos diodos de luz precisa de un elemento de ayuda para un funcionamiento eficaz como lo es el driver, adicionalmente en lo que respecta a armónicos este dispositivo electrónico trata de que el factor de potencia y la distorsión armónica (THDi) se localice dentro de la norma establecida con respecto a armónicos. En la Figura 2.2 se puede apreciar los diferentes componentes de una luminaria LED.

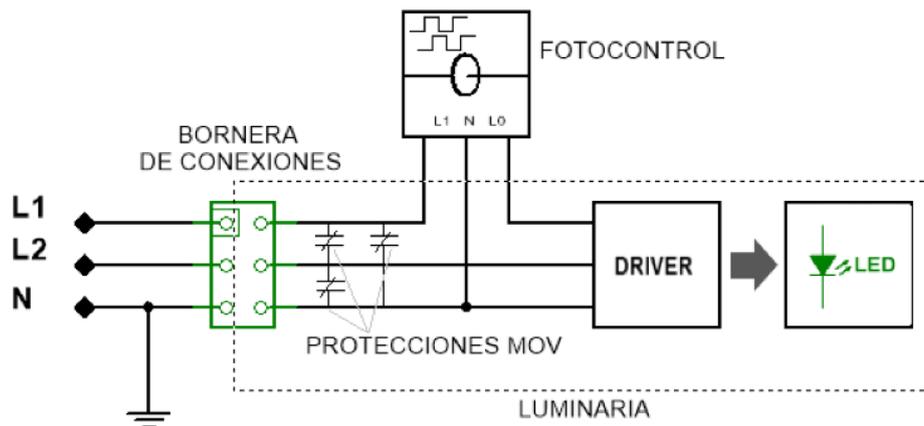


Figura 2.2: Esquema de arranque luminaria LED [Autores].

2.2 Calidad de Energía

La de onda de la energía eléctrica suministrada al usuario es de forma sinusoidal, pero mediante su proceso de transmisión y distribución esta onda sufre interrupciones, sobretensiones, variaciones de tensión, incluso niveles de distorsión armónica, etc. Al producirse estos aspectos se dice que ha existido una desviación de tensión, corriente o la frecuencia, provocando perdidas de energía y afectando la eficiencia de la energía.

La mejor condición de energía está dentro de la categoría del suministro de energía eléctrica relacionados con la calidad de onda, según el Estándar 1159-2019 del (IEEE) [23], ha creado un estándar en el que realiza el estudio de perturbaciones eléctricas y el seguimiento de la calidad de energía de los cuales citan los siguientes disturbios eléctricos:

- Distorsión Armónica.
- Interrupción o depresión de tensión.
- Fluctuaciones de tensión.

2.2.1 Distorsión Armónica

La norma IEEE 519-2022, tiene en cuenta “los armónicos son elementos con forma sinusoidal y periódicas, donde la partes de frecuencia fundamental dan paso a una solo frecuencia.” [24].



Figura 2.3: Ejemplo forma de onda con distorsión. [Autores]

Los armónicos surgen principalmente de las características no lineales de cargas conectadas al sistema eléctrico de potencia (SEP) que desgastan corrientes no lineales, produciendo tensiones no lineales en los nodos conectados.

Dentro de los impactos desfavorable de la distorsión armónica presente en la red eléctrica da paso a: aumento las daños y calentamiento excesivo de bobinado en transformadores, además de vibraciones y daños mecánicos, sobre calentamiento de conductores y malas maniobras al desconectar (interruptores, relés, motores, etc.).

Para entender las consecuencias que los armónicos pueden ocasionar en los sistemas eléctricos, se define los siguientes conceptos:

Frecuencia armónica (f_n)

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

$$f_n = n \times f_1 \quad [Hz] \quad (2.1)$$

Donde:

n : orden armónico.

f_1 : frecuencia fundamental.

Orden de un armónico (n,h)

Es el enlace de la frecuencia armónica f_n con la fundamental f_1 , expresada en un número entero [25].

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (2.2)$$

Iluminación LED que originan armónicos.

El Driver es el componente donde se originan los armónicos, el cual está compuesto por varios elementos pasivos, activos y semiconductores, también se puede decir que los Drivers trifásicos se usan para altas potencias (> 300 W), para monofásicos son usados en bajas potencias (< 25 W).

2.2.2 Depresión de tensión (SAG)

El encendido en equipos con altas cargas, además de fallas del equipamiento conectado a la red eléctrica dan paso a las causas comunes de depresión de tensión dando por resultado una caída significativa de tensión ocasionando el paro de equipo electro-electrónicos y la interrupción de los procesos productivos. Según el estándar IEEE 1159-2019 [23], esta depresión de tensión se da cuando se disminuye momentáneamente el valor eficaz de tensión en el rango de 0,1 a 0,9 [p.u] en un lapso de 0.5 ciclos hasta 1 minuto.

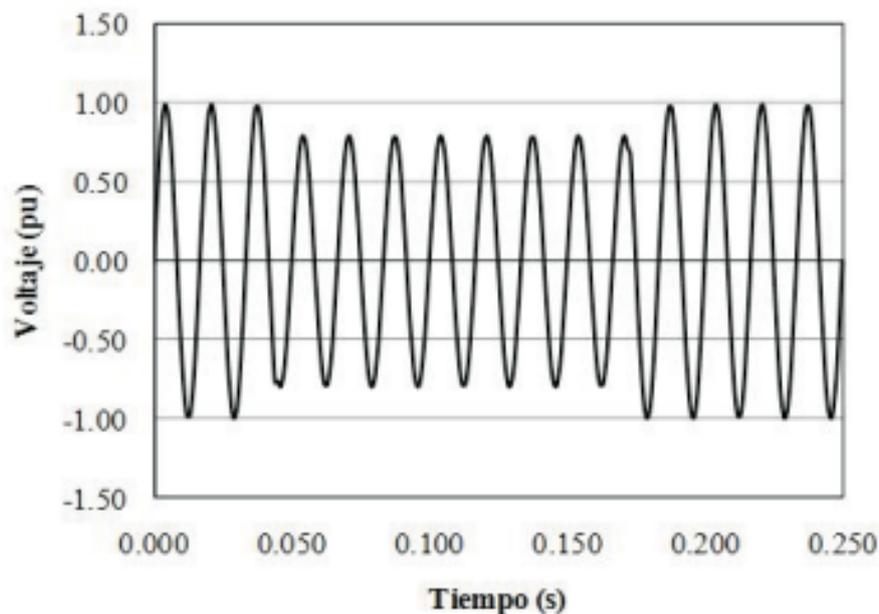


Figura 2.4: Ejemplo de onda de un SAGs.

Fuente: Osorio (2014)[26]

Eventos de corta duración en sistemas de iluminación.

En sistemas de iluminación sobre todo en el que se usan luminarias de alta descarga puede dar indicadores que permitan determinar niveles de compensación de energía que deber ser asumida por la empresa distribuidora de energía eléctrica, y imprescindible realizar un estudio de afectación de estas luminarias por los SAGs.

Tabla 2.1: Probabilidad de ocurrencia de SAGs de acuerdo a la causa

Causa	Porcentaje (%)
Arranques de cargas	35.0
Descargas	25.9
Fallas equipos	15.0

Fuente: Osorio (2014)[26]

Como se puede observar en la Tabla 2.1, la probabilidad de ocurrencias de SAG en luminarias se deben en mayor parte a arranques de cargas.

2.2.3 Fluctuaciones de tensión (FLICKER)

Esta perturbación se da por la variación sistemática de la forma de onda de tensión. Cualquier carga que muestre cambios considerables de corriente dan a paso a fluctuaciones de tensión, cuando exceden el rango de 0,95 a 1,05 [p.u].

Estas variaciones de tensión tienen una extensión menor a 1% y la ocurrencia de falla de 0 a 30 Hz. El flicker normalmente es el producto de las fluctuaciones rápidas de corta extensión de tensión de alimentación, dadas del cambio inestable de potencia que atraen los equipos eléctricos de gran potencia para su funcionamiento ejemplo: motores, máquinas de soldar, hornos de arco, etc [27].

Fluctuaciones en sistemas de iluminación.

El parpadeo de luz se especifica como la “impresión individual de la fluctuación de luminosidad” [28], la cual se da comúnmente en luminarias de sodio ya que se presentan variaciones considerables de corriente, donde se da la molestia del parpadeo detectable por el ojo humano. En la Figura 2.5, se observa una onda fundamental con disturbio de flicker, este fenómeno ocurre por cambios bruscos en la tensión de la red de 60Hz con lo cual se considera frecuencia de variación en el rango de 0.05 a 42 Hz estas dos con una tensión nominal de 120V.

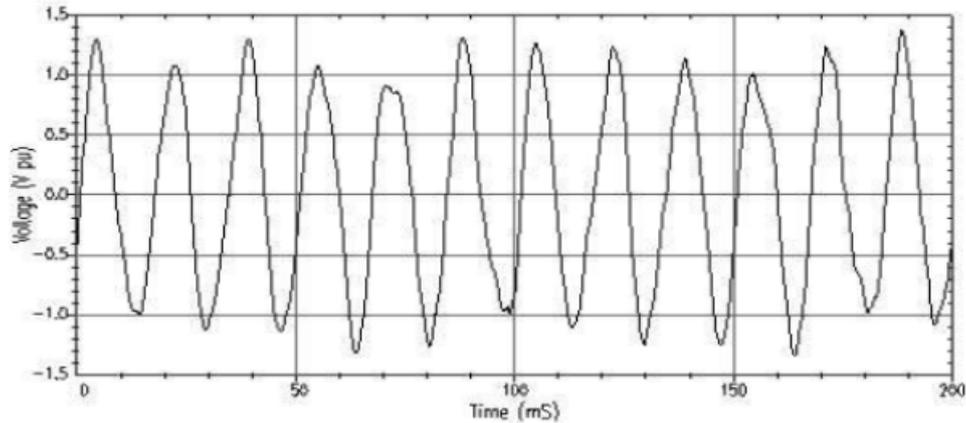


Figura 2.5: Ejemplo de onda de un FLICKER.
Fuente: Holguín & Gómez (2010)[27]

Umbral de irritabilidad del Flicker.- Estas son las fluctuaciones máximas de brillo que las personas pueden tolerar sin causar molestias. Por lo tanto, el índice de gravedad del parpadeo a corto plazo P_{st} debe ser igual a 1 como límite de estímulo asociado con la fluctuación de luminancia máxima que el ojo humano puede tolerar [29].

2.3 Normas vigentes respecto a la calidad de energía eléctrica

Los diferentes estatutos relacionadas al sector eléctrico son tanto nacionales como internacionales, por lo que se debe tener en consideración su vigencia y año de publicación para así evitar inconvenientes cuando se realiza diseños eléctricos tanto comercial e industrial con la respectiva medición y conexión de equipos entre otros parámetros eléctricos, para ellos las entidades más importantes que han publicado normas relacionado a este tema son:

- IEC: Internacional Electrotechnical Commission.
- IEEE: Institute Of Electrical and Electronics Engineers.
- ANSI: American National Standards Institute.
- ARCERNNR: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables.

Actualmente las más usadas al momento de realizar un estudio o diseño eléctrico se basan en (Normas IEC) y los (Estándares IEEE). En Ecuador se rige a las normativas, mediciones, límites que han sido dispuestos por ARCERNNR; a continuación, se amplía las normas correspondientes a las perturbaciones que se estudiaron en este trabajo de investigación.

2.3.1 Normas Aplicadas a la distorsión armónica

IEC 61000-3-2 “Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase”.

Esta norma engloba los límites armónicas de corriente presentes en la red eléctrica, además presenta los límites armónicos de corriente de entrada hasta 16 A que se puede presentar un equipo o componente eléctrico conectados a una red en baja tensión y se dividen según su uso:

[-] **Clase A:** Equipos trifásicos balanceados.

[-] **Clase B:** Herramientas portátiles.

[-] **Clase C:** Equipos de Luminosidad.

[-] **Clase D:** Equipos con consumo de potencia activa menor a 600W.

Dado que este proyecto se enfoca a equipos de luminosidad se hizo énfasis a la Clase C, en la cual según la norma distingue dos grupos, para equipos de iluminación con potencia activa de entrada >25 W y para equipos de iluminación de descarga con potencia activa de entrada de ≤ 25 W [30]. Las corrientes armónicas deben cumplir los siguientes límites citados en la Tabla 2.2.

IEEE std 519-2022. “Guía IEEE para la Aplicación y Especificación de Filtros Armónicos”.

Esta norma indica los límites armónicos presentes en el PCC (Punto Acoplamiento Común), que es la nexa fuente y usuario en el cual cita que para usuarios industriales el PCC se encuentra al lado de alta tensión del transformador y para clientes comerciales el PCC se encuentra ubicado al lado de baja tensión del transformador, para los dos casos cuando reciben el servicio a través de un transformador privado.

Tabla 2.2: Límites para equipos de Clase C

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

Fuente: *IEC 61000-3-2*. [30]

En la Tabla 2.3 indica los porcentajes de distorsión de tensión y corriente, en la cual las empresas distribuidoras deben realizar acciones necesarias de corrección para cumplir las características del sistema para que los límites de distorsión de tensión estén dentro del límite que indica la norma [24].

Tabla 2.3: Límites de distorsión de tensión

Voltaje V en PCC	Armónico individual	Distorsión armónica total THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5

Fuente: *IEEE Std 519-2022*. [24]

Regulación No. ARCERNNR-002/20 La Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), en su regulación 002/20-Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, establece los indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica, además define los procedimientos de medición, registro y evaluación a ser cumplidos por las empresas eléctricas de distribución y consumidores en el país [31] . Esta regulación vigente en Ecuador adopta los límites regidos por la IEEE Std 519-2014 en la cual engloba los límites de distorsión armónica de corriente, en el cual los diferentes consumidores serán los responsables de cumplir los límites establecidos o de realizar las correcciones para resolver los incumplimientos y estar dentro de los límites según el nivel de tensión como se indica en la Tabla.2.4.

Tabla 2.4: Límites máximos de armónicos de voltaje (% de voltaje nominal)

Nivel de voltaje	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

Fuente: *ARCERNNR 002/20*. [31]

2.3.2 Normas Aplicadas a fluctuaciones de tensión.

En el estudio de las fluctuaciones de tensión (flickers) se toma como base estas normas:

IEEE std 1453-2022 “IEEE Standard for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems”.

Las fluctuaciones de tensión en los sistemas eléctricos pueden provocar cambios significativos en la iluminación de los equipos de iluminación. La frecuencia de estas fluctuaciones de tensión está por debajo de 50 Hz o 60 Hz. Sin embargo, su frecuencia e intensidad pueden ser suficientes para provocar estimulación en humanos que observan cambios en la iluminación. Este fenómeno suele denominarse parpadeo, parpadeo de luminaria y en ocasiones parpadeo de tensión, por lo que esta norma recomienda niveles de planificación y cumplimiento para el parpadeo en los sistemas de energía. [32].

Niveles de planificación para parpadeo.

Este estudio hace referencia al nivel de P_{st} para poder estimar el impacto de este tipo de perturbación a la red eléctrica, este parámetro indica la medida de percepción de parpadeo a corto plazo medido en un lapso de 10 minutos, el cual debe cumplir los niveles de parpadeo según la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Niveles de planificación para P_{st} y P_{lt} en sistemas de potencia MV, HV y EHV.

	Niveles de planificación	
	MV	HV-EHV
P_{st}	0,9	0,8
P_{lt}	0,7	0,6

Fuente: *IEEE Std 1453-2022*. [32]

Niveles de compatibilidad para parpadeo

Se define como nivel de compatibilidad al nivel de P_{st} o P_{lt} cuando existe incomodidad y quejas por parte de los usuarios o consumidores, por lo cual esta norma presenta niveles de parpadeo en bajo y media tensión en sistemas de alimentación basándose en una probabilidad cerca del 95%.

Tabla 2.6: Niveles de compatibilidad de P_{st} y P_{lt} en BV y MV

	Niveles de compatibilidad
P_{st}	0.9
P_{lt}	0.8

Fuente: *IEEE Std 1453-2022*. [32]

Regulación No. ARCERNNR-002/20 Esta regulación 002/20-Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica [31], esta regulación vigente en Ecuador adopta los límites establecidos acorde a la norma IEC 61000-4-15 en el que se establece la severidad del flicker a corto plazo, en rangos de 10 minutos.

Además, este valor de P_{st} en el punto de medición no debe superar la unidad (1), es por ello que la distribuidora cumple este límite siempre y cuando al momento de realizar la medición el 95% de datos registrados en la red es inferior al límite acordado en un tiempo de siete días sin interrupción en la medición [31].

2.3.3 Normas Aplicadas a la depresión de tensión

IEEE std 1159-2019 “Prácticas recomendadas por IEEE para monitoreo de la calidad de energía eléctrica”.

Este estándar cubre las características de los sistemas eléctricos de corriente alterna monofásicos y polifásicos, además describe los fenómenos electromagnéticos que pueden causar daños en los sistemas eléctricos. También describe el origen de estos fenómenos electromagnéticos que se puede presentar en la fuente de alimentación, unidad de carga o interacción entre fuente de alimentación y carga. Por lo que esta norma presenta un análisis a los métodos de medición y lectura de resultados [23].

La Tabla 2.7, clasifica los fenómenos electromagnéticos según el argumento espectral, la magnitud y el tiempo de duración.

Tabla 2.7: Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos del sistema eléctrico.

Categorías.		Contenidos espectral típico.	Duración típica	Magnitud de voltaje típico.
Transitorios				
Impulsivo	Nanosegundo	5 ns de elevación	< 50 ns	
	Microsegundo	1 μ s de elevación	50 ns - 1 ms	
	Milisegundo	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
Oscilatorio	Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0-4 pu
	Media frecuencia	5 - 500 kHz	20 μ s	0-8 pu
	Alta frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 μ s	0-4 pu
Variaciones rms de corta duración.				
Instantáneo	Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
	Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
Momentáneo	Interrupción		0.5 ciclos - 3s	< 0.1pu
	Sag		30 ciclos - 3s	0.1-0.9 pu
	Swell		30 ciclos - 3s	1.1-1.4 pu
Temporal	Desbalance de voltaje		30 ciclos - 3s	2% - 15%
	Interrupción		>3s - 1min	0-4 pu
	Sag		>3s - 1min	0.1-0.9 pu
	Swell		>3s - 1min	1.1-1.4 pu
	Desvalance de voltaje		>3s - 1min	2% - 15%
Variaciones rms de larga duración.				
Interrupción sostenida			> 1 min	0.0 pu
Subvoltaje			> 1 min	0.8 - 0.9 pu
Sobrevoltaje			> 1 min	1.1 - 1.2 pu
Sobre carga de corriente			> 1 min	
Desbalance.				
Voltaje			Estado estable	0.5 - 5%
Corriente			Estado estable	1.0 - 3.0 %
Distorsión de forma de onda.				
Offset de DC			Estado estable	0 - 0.1%
Armónicos		0 - 9 kHz	Estado estable	0 - 20%
Interarmónicos		0 - 9 kHz	Estado estable	0 - 20 %
Muecas		0 - 9 kHz	Estado estable	0 - 2 %
Ruido		banda ancha	Estado estable	0-1%
Fluctuaciones de voltaje.		<25 kHz	Intermitente	0.1 - 7%
Variaciones de frecuencia de potencia.				0.2 - 2 P_{st}
			< 10s	$\pm 0.10Hz$

Fuente: *IEEE Std 1159-2019*. [23]

Un punto importante para destacar en esta remota lista es la subdivisión de los fenómenos electromagnéticos, los cuales se definen en esta norma en 7 categorías, tales como: transitorios, cambios a corto plazo, cambios a largo plazo, inestabilidad de tensión, disturbios en la forma de onda, fluctuaciones y cambios de frecuencia.

NORMA EN 50160. “Características de tensión suministrada por las redes generales de distribución”.

Aquí se pauta los principales parámetros de tensión y los respectivos márgenes de desviación admitidos en el punto de acoplamiento común (PCC), en la red eléctrica de baja y media tensión” [33].

En la Tabla 2.8, indica los límites generales para la tensión proporcionada en base a la norma antes mencionada.

Tabla 2.8: Requisitos del voltaje de suministro.

Categorías.		Contenidos espectral típico.	Duración típica	Magnitud de voltaje típico.
Transitorios				
Impulsivo	Nanosegundo	5 ns de elevación	< 50 ns	
	Microsegundo	1 μ s de elevación	50 ns - 1 ms	
	Milisegundo	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
Oscilatorio	Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0-4 pu
	Media frecuencia	5 - 500 kHz	20 μ s	0-8 pu
	Alta frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 μ s	0-4 pu
Variaciones rms de corta duración.				
Instantáneo	Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
	Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
Momentáneo	Interrupción		0.5 ciclos - 3s	< 0.1pu
	Sag		30 ciclos - 3s	0.1-0.9 pu
	Swell		30 ciclos - 3s	1.1-1.4 pu
	Desbalance de voltaje		30 ciclos - 3s	2% - 15%
Temporal	Interrupción		>3s - 1min	0-4 pu
	Sag		>3s - 1min	0.1-0.9 pu
	Swell		>3s - 1min	1.1-1.4 pu
	Desvalance de voltaje		>3s - 1min	2% - 15%
Variaciones rms de larga duración.				
Interrupción sostenida			> 1 min	0.0 pu
Subvoltaje			> 1 min	0.8 - 0.9 pu
Sobrevoltaje			> 1 min	1.1 - 1.2 pu
Sobre carga de corriente			> 1 min	
Desbalance.				
Voltaje			Estado estable	0.5 - 5%
Corriente			Estado estable	1.0 - 3.0 %
Distorsión de forma de onda.				
Offset de DC			Estado estable	0 - 0.1%
Armónicos		0 - 9 kHz	Estado estable	0 - 20%
Interarmónicos		0 - 9 kHz	Estado estable	0 - 20 %
Muecas		0 - 9 kHz	Estado estable	0 - 2 %
Ruido		banda ancha	Estado estable	0-1%
Fluctuaciones de voltaje.		<25 kHz	Intermitente	0.1 - 7% 0.2 - 2 P_{st}
Variaciones de frecuencia de potencia.			< 10s	$\pm 0.10Hz$

Fuente: *UNE-EN 50160:2011/A2:2020*. [33]

Tabla 2.9: Valores de las tensiones armónicas individuales en los terminales de entrada para órdenes de hasta 25.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	voltaje relativo (%)	Orden h	tensión relativa (%)	Orden h	tensión relativo (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6 - 24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Fuente: *UNE-EN 50160:2011/A2:2020* [33]

2.4 Iluminación

2.4.1 Conceptos luminotécnicos

La regulación ARCERNNR 006/20 “Prestación del Servicio de Alumbrado Público General” [16], cita estos importantes ítems luminotécnicos:

Flujo Luminoso: La intensidad transmitida en forma de flujo luminoso a la que el ojo humano es capaz de soportar esta sensibilidad a la luz. Representado por Φ , y su unidad de medida el lumen (lm).

Iluminancia (E): Concentración del flujo luminoso que va directo a la superficie (A). La iluminancia es diferente de la dirección en la que el flujo luminoso llega a la superficie, expresada en lux (lx) o a su vez en lúmenes por metro cuadrado (lm/m^2).

$$E = \frac{d\phi}{dA}[lx] \quad (2.3)$$

Además, se determina como el enlace entre el flujo luminoso incidente sobre un espacio y el área sombreada. Ver Figura 2.6.

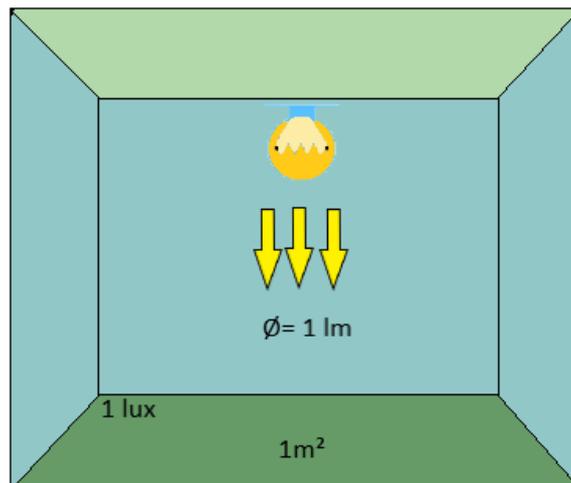


Figura 2.6: Iluminancia. [Autores]

Intensidad Luminosa:

Es la luminosidad difundido por su magnitud de ángulo sólido (Ω) el cual direcciona el rumbo específico como se observa en la Figura 2.7, su signo es (I) y magnitud candela (cd).

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} [cd] \quad (2.4)$$

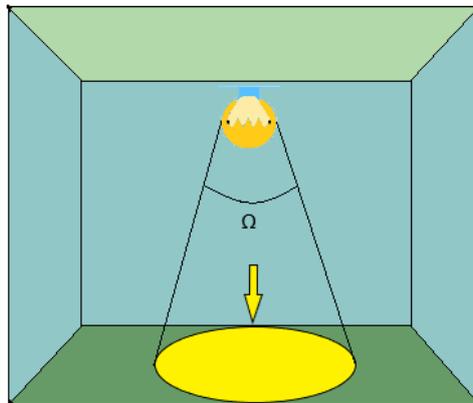


Figura 2.7: Intensidad Luminosa. [Autores]

Luminancia:

Es el vínculo en medio de la intensidad luminosa y el área observada por el ojo humano en cierta línea visual determinada. Conocida por su magnitud candela por metro cuadrado (cd/m^2) con símbolo (L).

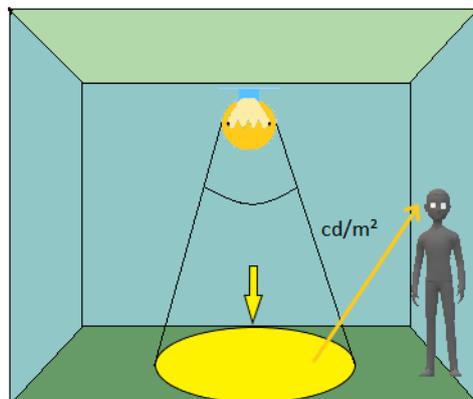


Figura 2.8: Luminancia. [Autores]

2.4.2 Alumbrado Público General

El alumbrado público general es el alumbrado para el paso de personas y/o vehículos en la vía pública. No incluye el alumbrado de las áreas públicas de los inmuebles declarados como propiedad horizontal, el alumbrado público decorativo (parques de diversiones, campos de juego, santuarios, etc.) e intervenida.

2.4.2.1 Normativa Vigente

Las empresas distribuidoras responsables de la prestación del Servicio de alumbrado público general deben cumplir con los parámetros técnicos según el tipo de vía y característica de la calzada establecidos en la regulación ARCERNNR 006/20 “Prestación del Servicio de Alumbrado Público General”. La cual cita los siguientes requisitos fotométricos de luminancia e iluminancia.

Vías para tráfico motorizado.

Según el “Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público” clasifica la iluminación en cinco niveles de M1 a M5. A la hora de elegir se tienen en cuenta las siguientes características: uso de calzada o pista, tráfico de vehículos y peatones, grado de dificultad y control de bicicletas (semáforos y señales de tráfico).

Tabla 2.10: Clases de alumbrado para diferentes tipos de vías públicas

Descripción de la vía	Tipo de iluminación
Vías de alta velocidad, con pistas separadas libres de intersecciones al mismo nivel y con accesos completamente controlados, autopistas, autovías. Con densidad de tráfico y complejidad de circulación:	
Alta (más de 1000 vehículos/hora)	M1
Media (entre 500 y 1000 vehículos/hora)	M2
Baja (entre 150 y menos de 500 vehículos/hora)	M3
Vías de alta velocidad, vías con doble sentido de circulación. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía:	
Pobre	M1
Bueno	M2

Vías urbanas de tráfico importante, carreteras radiales. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía:	
Pobre	M2
Bueno	M3
Vías secundarias de conexión, carreteras distribuidoras locales, vías de acceso principales residenciales, carreteras que proporcionan acceso a propiedades y conducen a conexiones de carreteras. Con control de tráfico y separación de diferentes usuarios de la vía:	
Pobre	M4
Bueno	M5

Fuente: *ARCERNNR 006/20*. [16]

Parámetros fotométricos para vías con tráfico motorizado.

Una vez entendidas las características de la vía y sus requerimientos visuales, es necesario especificar el nivel de iluminación deseado. Para cada nivel de iluminación define el requisito fotométrico mínimo que debe mantenerse en el tiempo, los cuales se muestran en la tabla 2.11 para luminancia.

Tabla 2.11: Luminancia de calzada para tráfico motorizado.

Clases de iluminación.	Todas las vías			Vías sin o con pocas intersecciones	Vías con aceras no iluminadas para clases P1 a P4
	Luminancia promedio L_{prom} (cd/m^2) Mínimo mantenimiento	Factor de uniformidad U_o Mínimo	Tl% Máxima inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia U_l Mínimo	Relación de entorno SR mínima
M1	2	0.4	10	0.7	0.5
M2	1.5	0.4	10	0.7	0.5
M3	1.0	0.4	10	0.7	0.5
M4	0.8	0.4	10	NR	NR
M5	0.6	0.4	10	NR	NR

Notas: NR = No requerido.

Fuente: *ARCERNNR 006/20*. [16]

Se puede hacer diseños con valores mínimos de luminancia para vías tipo M3, M4 Y M5 como se indica en la Tabla 2.12, para las clases de iluminación faltantes se realiza diseños con luminancia de calzada como se indica en la Tabla 2.11

Tabla 2.12: Valores mínimos de iluminancia promedio (lux) en vías motorizadas.

Clase de iluminación	Valor promedio de iluminancia según tipo de superficie de la vía (lx) (ver tabla 2.10)			Uniformidad de la Iluminancia
	R1	R2 y R3	R4	Emin/Eprom (5)
M3	12	17	15	34%
M4	8	12	10	25%
M5	6	9	8	18%

Fuente: *ARCERNNR 006/20*. [16]

Tabla 2.13: Características de la superficie.

Clase	Características de la superficie
R1	<ul style="list-style-type: none"> - Superficies de asfalto con un mínimo del 15% de materiales reflectivos o materiales artificiales claros o al menos un 30% de anortositas muy brillantes - Superficies que contienen gravas que cubren más del 80% de la superficie de la calzada, y las gravas constan de gran cantidad de material claro, o reflectivo o estan compuetas al 100% de anortositas muy brillantes - Superficies de calzada de hormigón de concreto
R2	<ul style="list-style-type: none"> - Superficies con textura rugosa que contienen agregados normales - Superficies asfálticas (avimentos bituminosos que contienen el 10% al 15% de abrilladores artificiales) - Hormigón bitumoso grueso y rugoso, rico en gravas (mas del 60 %) de tamaños mayores a 10mm. - Asfalto mastico después de ser tratado. Se conoce también como asfalto mastico en estado nuevo
R3	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimiento en hormigón (asfalto frió, asfalto cemento) con tamaño de grava superior a 10mm. con textura rugosa - Superficies tratadas con textura rugosa pero pulimentada
R4	<ul style="list-style-type: none"> - Asfalto mastico después de varios meses de uso - Superficies con textura bastante suave o pulimentada.

Fuente: *ARCERNNR 006/20*. [16]

Vías para tráfico peatonal.

En la Tabla 2.14, muestra la clasificación de vías según el uso de la calzada, es decir la intensidad de utilización de la vía.

Mientras que los parámetros fotométricos para tráfico peatonal descritos anteriormente, se definen en la Tabla 2.15.

Tabla 2.14: Clases de iluminación para diferentes tipos de vías en áreas peatonales y de ciclistas

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

Fuente: *ARCERNNR 006/20*. [16]

Tabla 2.15: Características de la superficie.

Clase de Iluminación	Iluminación (lx)	
	Valor Promedio (*)	Valor Mínimo (*)
P1	20	7,5
P2	10	3,0
P3	7,5	1,5
P4	5,0	1,0
P5	3,0	0,6
P6	1,5	0,2

Fuente: *ARCERNNR 006/20*. [16]

2.5 Software DIALux®

Este software permite desarrollar un diseño de iluminación para cualquier proyecto arquitectónico. Al realizar la simulación se obtiene un registro con toda la información óptima del proyecto realizado y fácil de entender.

Además, este programa permite observar los niveles de iluminancia y los diferentes cálculos de nivel de deslumbramiento en el ambiente que se está trabajando. La finalidad de este programa es realizar un estudio del flujo luminoso que se producen entre distintos tipos de luminarias ya sea por su tipo de tecnología o marca lo cual es de gran importancia al momento de realizar un diseño de iluminación.

2.6 Equipos

Los diferentes instrumentos de medición tanto para perturbaciones eléctricas como de flujo luminoso utilizados a lo largo del desarrollo de este proyecto técnico se detallan a continuación.

2.6.1 Analizador de redes Fluke 435 II

Las diferentes perturbaciones eléctricas tanto en luminarias de sodio y en luminarias LED utilizó un analizador de redes de la marca FLUKE, favorecido por el departamento de laboratorios de la carrera.

Este dispositivo de medición está diseñado para resolver sigilosamente los problemas de calidad de la energía y determinar el costo de las pérdidas de energía por medio de un proceso de medida y lectura de datos se obtiene información relevante a la calidad de energía.



Figura 2.9: Analizador de redes trifásico FLUKE 435
Fuente: Manual Fluke 435-II [34]

Este modelo 435-II tiene una particularidad de funciones de medición con una precisión de ingreso de tensión del 0,1 %. Además de las medidas de potencia, calidad eléctrica, calculadora de calidad eléctrica, energía y pérdida de energía, corriente de entrada, eficiencia del inversor también realiza un estudio avanzado de formas de onda de eventos, parpadeo, transitorios, entre otras perturbaciones.

Este instrumento tiene un gran rango de precisión al momento de realizar las diferentes mediciones tal como se muestra en la Tabla.2.16.

Tabla 2.16: Especificaciones técnicas FLUKE 435.

Descripción	Rango	Precisión
Tensión Vrms (ac+dc)	1 a 1.000 V	±0,1% del valor nominal (FL435)
Corriente Arms (ac+dc)	0 a20.000 A	±0,5%±5 recuentos
Frecuencia	42,50 57,50 Hz	±0,01%
Armónicos	D.c., 1-50(desconexión, 1-49)	
Vatios de potencia, VA, VAR	1,0-20 MVA	±1,0%±10 recuentos
Energía *kWh, kVAh, kVARh	0,00-200,0 GVAh	±1,5%±10 recuentos
Factor de potencia	0-1	±0,03
Parpadeo Pst(1 min), Pst, Plt, PF5	0,00-20,00	±5%
Voltios de desequilibrio	0,0-5,0%	±0,15%
Corriente de desequilibrio	0,0-20%	±1%
Captura transitoria	±6.000V	±2,5% de Vrms
Tiempo de captura transitorio min	±6.000V	
Irrupción Arms (ac+dc)	0,00-20,00 kA	±1% de la medida ±5 recuentos

Fuente: *Manual Fluke 435-II*. [34]

2.6.2 Fuente programable CHROMA 61702

Es una fuente de alimentación programable con selector digital para seleccionar tensión o corriente de salida. Por lo tanto, hoy en día existen diversas aplicaciones que involucran salidas de CC y CA, El modelo de la fuente que se utilizó para este trabajo corresponde de la marca CHROMA Modelo 61702 esta ubicado en el laboratorio de máquinas eléctricas, este tipo de ofrece alimentación de CA trifásica, en donde los usuarios pueden programar tensión y frecuencia, y medir las características críticas de la salida el cual se aprecian en su pantalla LCD.

Este diseño de fuente programable ofrece al usuario precisión y alta velocidad en diversas medidas como la programación de formas de onda de tensión, ya que este dispositivo permite aumentar o disminuir la tensión de entrada de una línea, y también puede disminuir la corriente de entrada según la configuración de la red.

Características:

- Ángulo de fase: 0º a 360º Programable.
- PFC incorporado, proporciona un factor de potencia de entrada de más de 0,98.
- Modo de salida CA-CC.
- Capacidad de medición integral, V, Irms, lpk, linrush, P, PF, CF de corriente, etc.
- Límite de corriente rms programable.
- Encender, apagar el control de ángulo de fase.
- Interfaz opcional GPIB y RS-232.



Figura 2.10: Fuente variable AC [Autores]

2.6.3 Luxómetro AMPROBE LM-120

Este equipo es útil para medir los niveles de luz en interiores y exteriores, disminuir o agregar luminarias, facilitando en la reducción de la carga energética de la red aumentando la eficacia de los sistemas de iluminación.

Características:

- Mide lux o fotocandelas.
- Intervalo de medición de 200 000 lux o 20 000 pies/candela.



Figura 2.11: Luxómetro marca AMPROBE LM-120 [Autores]

2.6.4 Luminancímetro Mavo Spot 2

Es un luminancímetro profesional de precisión, el cual permite medir desde una distancia de 1 m hasta el infinito en un ángulo de tan solo 1° . Con un teleobjetivo adicional, puede reducir la distancia mínima a 34 cm. Además, gracias a la óptica reflectante con un campo de visión de 15° y un círculo de enfoque de 1° , el objeto de medición queda perfectamente marcado en el centro.

Características:

- Sensibilidad. - Una gran sensibilidad espectral del luxómetro para mejor confort al ojo humano.
- Memoria. - Permite guardar 1000 datos de medición que pueden ser analizados al transferir a una PC por medio del puerto USB que cuenta el instrumento.



Figura 2.12: Luminancímetro Mavo Spot 2 [Autores]

2.6.5 Distanciómetro FLUKE 416D

Están diseñados para un uso en interiores y exteriores. Ambos modelos son fáciles de usar con la durabilidad y la calidad que espera de Fluke. Y con las teclas de suma, resta, área y volumen, medir no podría ser más fácil. El láser ultra-brillante es claramente visible, por lo que siempre puede ver su objetivo, incluso si está en lugares de difícil acceso o lejos. Estos dispositivos tienen una gran pantalla LCD y botones para medir con una sola mano.

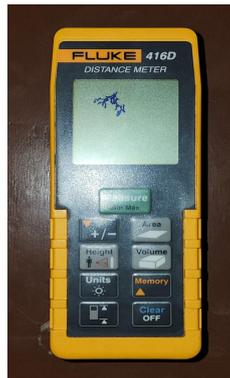


Figura 2.13: Distanciómetro FLUKE 416D [Autores]

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Ensayo en laboratorio

Las pruebas realizadas son con respecto a la medición de armónicos, flicker y sags tanto de tensión como de corriente producido por una luminaria de sodio y LED. Las normas que se emplean como guía para este tipo de pruebas son: IEC 61300-3-2, IEEE std 519-2022, IEEE std 1453-2022, IEEE std 1159-2019 y ARCERNNR-002/20 descritas en el capítulo anterior.

3.1.1 Selección de luminarias

Se ha adquirido 3 luminarias de sodio de 150W y 3 luminarias LED de 100W, por lo cual se realizó el cálculo de lúmenes equivalentes (lm_{eq}) mediante el dato de flujo luminoso de la luminaria y el valor de relación F/E, para verificar si se puede sustituir adecuadamente la luminaria de vapor de sodio por una LED. En la Tabla 3.1, se observa las características de cada una.

Tabla 3.1: Características de luminarias.

	Sodio	LED
	Marca 1	Marca 2
Potencia (W)	150	100
Flujo luminoso (lm)	17000	10000
Rendimiento luminoso (lm/W)	113	100
Iluminancia (lux)	19.39	12.25
Temperatura de color (°K)	3500	5000
Índice de reproducción cromática (%)	24	80

Fuente: Autores.

Relación Fotópica/Escotópica (F/E)

La CIE (Comisión Internacional de Iluminación) establece una recomendación técnica CIE 191:2010: SISTEMA RECOMENDADO PARA FOTOMETRÍA MESÓPICA BASADO EN RENDIMIENTO VISUAL, relaciona la visión escotópica (E) referente a la percepción visual de niveles de iluminación muy baja o conocida como visión nocturna; y la visión fotópica (F) referente a niveles de iluminación a plena luz del día. Dando así una tabla de relación F/E de las diferentes fuentes de luz. Ver Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Relación F/E aproximados para diferentes fuentes de luz

Fuente de luz		Relación F/E
Amarillo- blanco	Sodio Alta Presión	0,65
Blanco cálido	Halogenuros Metálicos	1,25
Blanco cálido	LEDs	1,3
Blanco frio	Halogenuros Metálicos	1,8
Blanco azulado	LEDs	2,15

Fuente: Bommel.[35]

Con los datos de flujo luminoso (lm) de la Tabla 3.1 y el valor de la ratio S/P de la Tabla 3.2 se calcula el valor de lúmenes equivalentes (lm_{eq}) este valor no debe ser muy distante entre los resultados de lm_{eq} de sodio y LED, si es el caso se debe elegir otra luminaria LED con mayor valor de flujo luminoso. Los lúmenes equivalentes se calculan mediante la siguiente formula:

$$lm_{eq} = lm * relacion \ F/E \quad (3.1)$$

3.1.2 Circuito de ensayo

En el circuito de prueba utilizado para la medida de las diferentes perturbaciones, se conectó los dos tipos de luminarias de forma individual y mediante un PCC (Punto de Acoplamiento Común) a una tensión de 220V usando una fuente de alimentación de la red del laboratorio de Maquinas Eléctricas en donde se realizó las mediciones, además de una fuente programable Chroma. Ver figura 3.1

El tiempo de medición de las perturbaciones fue de 10-15 min, además de un tiempo de 10 min luego de haber encendido las luminarias para que se estabilice la corriente.

La conexión del Fluke 435-II se realizó mediante el esquema presentado en el manual del equipo para así evitar mediciones y lectura errónea de datos.

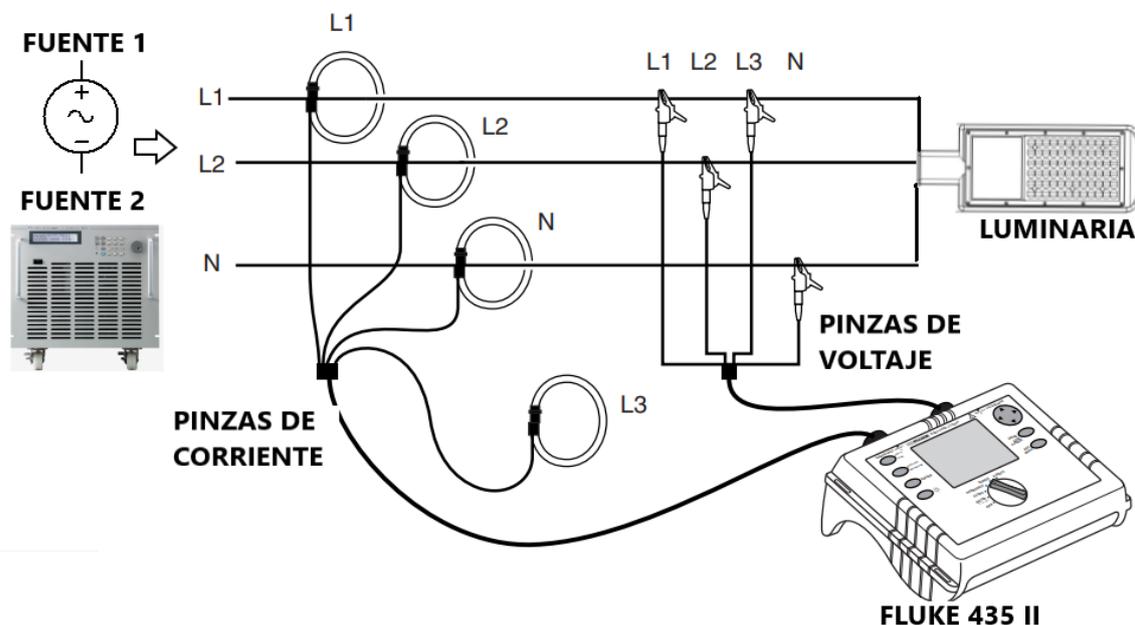


Figura 3.1: Esquema de prueba para medir diferentes perturbaciones eléctricas.[Autores]

3.1.3 Equipo de medida

Para dar severidad a los distintos datos medidos el analizador de redes debe cumplir con las normativas, valores de precisión, resolución y rango. Por lo que el equipo FLUKE 435 II cumple satisfactoriamente con los estándares relacionados con armónicos, parpadeo y desequilibrio de tensión. Ver Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Estándares que cumple el analizador FLUKE 435 II

	Rango de medida	Resolución	Precisión
Armónicos	Norma IEC 61000-4-7		
Voltios THD	0 ... 100,%	0,1%	± 5%
Amperios THD	0 ... 100,%	0,1%	± 2,5%
Parpadeo	Norma IEC 61000-4-15		
Plt, Pst, Pst (1 minuto), Pinst	0,00 ... 20,00	0,01	± 5%
Desequilibrio	Norma IEC61000-4-30		
Voltios %	0,00 ... 20,0%	0,1%	± 0,1%
Amperios %	0,00 ... 20,0%	0,1%	± 1%

Fuente: *Manual Fluke 435 II*. [34]

El analizador de redes midió y registró armónicos hasta el número 50 y los diferentes valores de THD (distorsión total por armónicos). Con lo que respecta a flickers y sags el equipo muestra una gráfica del cambio de la corriente y mediante tablas indica en que tiempo durante la medición se presentó la perturbación.



Figura 3.2: Pruebas en el laboratorio. [Fuente: Autores]

3.1.4 Lectura de datos

Luego del periodo de ensayo de cada tipo de luminaria se procede a descargar los datos al PC mediante el cable USB proporcionado por el equipo, en el cual se obtuvo los datos con valor máximo, medio y mínimo, para este estudio se utilizó los datos medios los cuales reflejan el valor promedio más real de las perturbaciones medidas.

3.2 Procedimiento de medición de perturbaciones eléctricas

3.2.1 Distorsión Armónica

Para la verificación y comparación de esta perturbación, se siguió los límites de la norma IEC 61000-3-2 “Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)”, en la Tabla 2.2, se muestra los armónicos de diferente orden con su límite en aparatos clase C. La medición de distorsión armónica se realizó en las siguientes condiciones:

- En entrada y salida en el PCC del circuito realizado.
- Utilizando fuente fija del laboratorio y una fuente programable Chroma, para cada tipo de luminaria.

- Las combinaciones de encendido para los dos tipos de luminarias fueron: 1 encendida con 2 apagadas, 2 encendidas con 1 apagada y finalmente las 3 luminarias encendidas a la vez.

Cabe recalcar que se obtuvo de 24 mediciones con todas las combinaciones antes indicadas, esto debido a que se utilizó las dos fuentes de alimentación.

3.2.1.1 Medición de la Distorsión Armónica

Se conectó el Fluke 435-II a las luminarias lo cual se tomó mediciones en entrada y salida del PCC con las diferentes combinaciones. Para las distintas condiciones de medición, las luminarias permanecieron encendidas durante 10 minutos para obtener su equilibrio de corriente y posteriormente dar pulsación correspondiente en el equipo para la medición de armónicos.

Medición de armónicos con fuente fija.

Los cables de conexión van directamente a la fuente de alimentación del laboratorio donde se realizó el ensayo, el tiempo de medición fue de 10-15 minutos aproximadamente, obteniendo 121 datos en diferentes tiempos de medición, que posteriormente mediante Excel se obtiene:

- Distorsión armónica total de tensión (THD_v) y de corriente (THD_i).
- Armónico de corriente y voltaje desde el 3er al 11vo orden.

Medición de armónicos con fuente programable.

Para la medición de armónicos con fuente variable AC es posible realizar una programación de distorsión armónica de la forma de onda de salida respecto a la tensión. Antes de la programación se realiza el enlace entre la fuente programable AC y la PC, por medio del cable USB, posteriormente en el Software *SoftPanel* de Chroma se elige la función *WAVEFORM EDITOR*, y se ejecuta la simulación.

Tanto para fuente fija como fuente variable se obtuvo los datos de THD_i y THD_v y orden de armónicos que se presentaron en los dos tipos de luminarias.

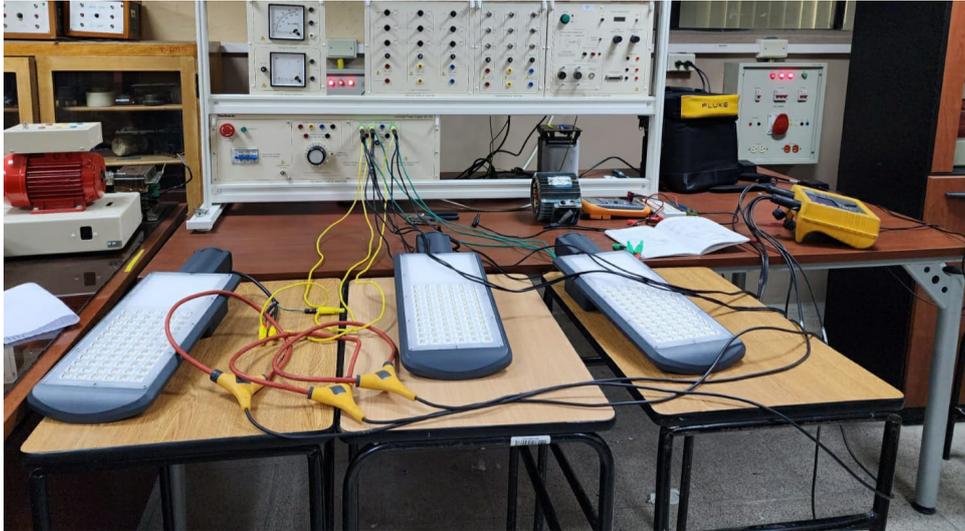


Figura 3.3: Medición de armónicos con fuente fija [Fuente: Autores]



Figura 3.4: Medición de armónicos con fuente variable AC [Fuente: Autores]

3.2.2 Medición de fluctuación de tensión (Flicker)

Para comparar los niveles de planificación de parpadeo, se siguió los límites de la norma IEEE std 1453-2022 “Estándar para Medición y Límites de Fluctuaciones de Voltaje y Parpadeo de Luz Asociado en Sistemas de Alimentación de CA”. La cual se expresa el flicker en dos parámetros el P_{st} (corto plazo) y el P_{lt} (a largo plazo), el tiempo de medición fue de 10-12 minutos aproximadamente conectando el analizador de redes al igual que en la medición de la distorsión armónica y esquema antes mencionado. Las mediciones de fluctuaciones de tensión se lo realizaron en:

- El circuito de iluminación conectado a una fuente fija.
- En circuito de iluminación conectado a fuente programable Chroma.

3.2.2.1 Medición de flickers con fuente fija.

Al realizar las mediciones de las fluctuaciones de tensión (flickers) con el uso de la fuente de alimentación del laboratorio, se obtuvo 753 datos en diferentes tiempos de medición, que posteriormente mediante Excel se obtienen los siguientes datos:

- P_{st} (severidad de flicker a corto plazo).
- $P_{st_{1min}}$ (severidad de flicker a corto plazo en 1 minuto).

Una vez realizada las conexiones correspondientes se procede a configurar el equipo Fluke 435 II, en el cual una vez encendido el equipo con la tecla MENU se despliega las diferentes funciones en la cual se elige el modo *Flicker*. Ver figura 3.5



Figura 3.5: Pantalla de menú con selección de modo (Flicker).
Fuente: *Manual Fluke 435-II*. [34]

3.2.2.2 Medición de flickers con fuente programable Chroma

Con el uso de la fuente programable es posible simular fluctuaciones de tensión, obteniendo datos de P_{st} (severidad de parpadeo a corto plazo), mediante la función LIST MODE del Software *SoftPanel de Chroma*.

Posteriormente se ingresa los valores nominales como el valor de alimentación y la frecuencia (220V, 60 Hz), luego dar clic en el botón *Trig On* que posteriormente se producirá la perturbación de parpadeo en las luminarias, donde el equipo registra los datos para su análisis.

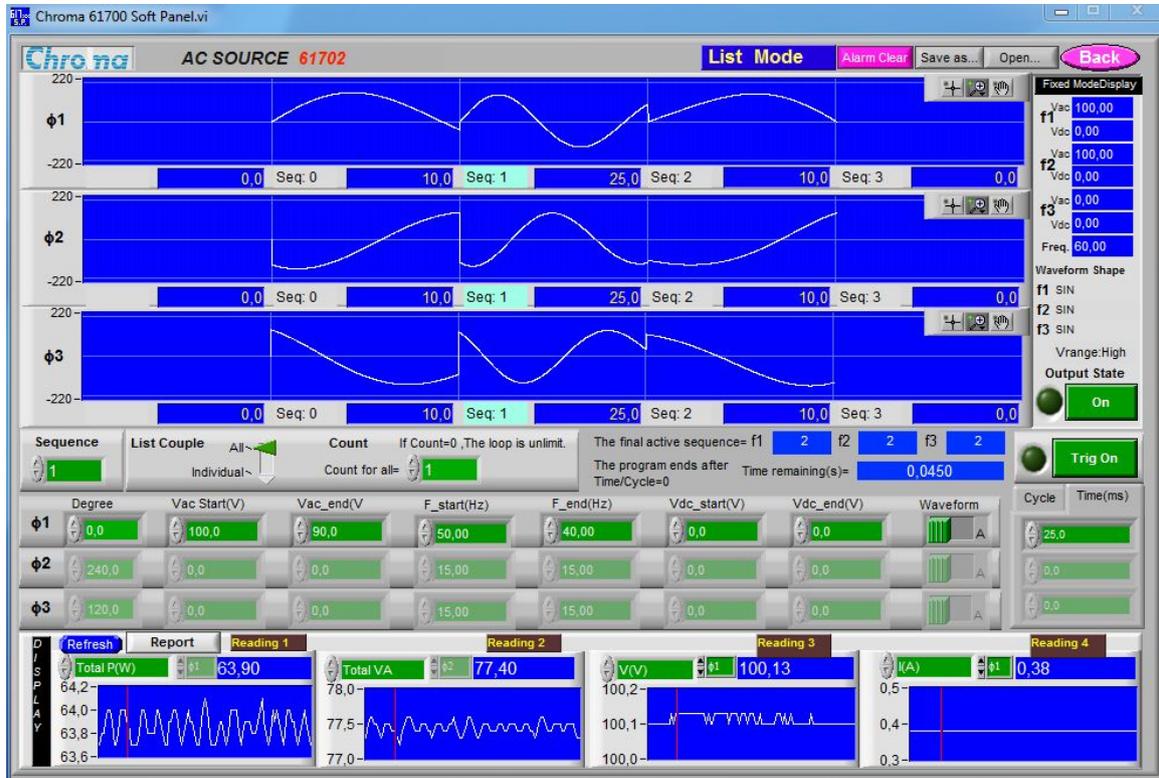


Figura 3.6: Pantalla de la forma de onda con presencia de flicker [Fuente: Autores]

En la programación del flicker de los diferentes parámetros y secuencias fueron los mismos para los dos tipos de luminarias para poder realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos.

3.2.3 Medición de la depresión de tensión (Sag)

El aumento de tensión que se pueden presentar en las luminarias se las puede clasificar según el tipo de duración conforme a la normativa IEEE std 1159-2019 "Práctica Recomendada por IEEE para Monitorear la Calidad de la Energía Eléctrica", en la que se presentaron variaciones de corta y larga duración, generando así una disminución de la luminosidad en las luminarias de sodio y LED.

3.2.3.1 Configuración del Fluke 435-II para Sags

El enlace de pinzas del equipo es la misma que fue realizada para la medición de armónicos y flickers descritas anteriormente, para configurar correctamente el equipo para este tipo de perturbación se usó la opción *Fluctuaciones*. Ver Figura 3.7



Figura 3.7: Pasos para medir Fluctuaciones en el equipo.
Fuente: *Manual Fluke 435 II*. [34]

Para la simulación en el *Software SoftPanel de Chroma* se realizó 4 mediciones de tensión (70, 80, 90, 100)V que serán los valores establecidos para generar la perturbación y posterior medición y registro de datos en el analizador de redes que se está usando.

3.3 Procedimiento de medición de parámetros lumínicos

Se utilizó un luxómetro de la marca AMPROBE LM-120 y un luminancímetro MAVO SPOT 2. La norma UNE-EN 13201-2:2016 enfocada a la iluminación de vías, sirve de base para los cálculos de altura de instalación, interdistancia, además del tipo de vía y material de la calzada, las mediciones se detallan a continuación.

Identificación tipo de vía.

Las mediciones se realizaron en la zona de parqueo junto a la planta de energía solar fotovoltaica por lo que la vía es de un tramo recto con implantación UNILATERAL. Ver Figura 3.8.

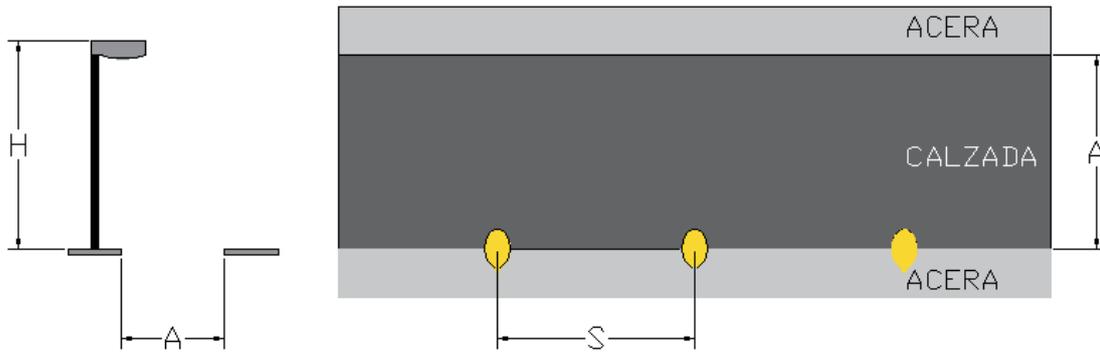


Figura 3.8: Implantación Unilateral. [Autores]

3.3.1 Medición de iluminancia

Para la medición de este parámetro se realizó el procedimiento del factor de utilización y de los nueve puntos el cual se detallan a continuación:

Método del factor de utilización.

Permite calcular la interdistancia, y que este valor cumpla el nivel de iluminancia media (E_m) requerido por la normativa UNE-EN 13201-2:2016. ILUMINACIÓN DE CARRETERAS. Cabe recalcar que este sirve como base de referencia ya que los cálculos no pueden ser muy exactos. Para el cálculo de la interdistancia se debe conocer:

- Valor de iluminancia media (E_m)

El valor del nivel de iluminancia media (E_m), depende de la característica de vía, tipo de pavimento y nivel de tráfico para lo cual las siguientes tablas son de guía para el correcto valor de iluminancia media (E_m). Ver Tabla 3.4

Tabla 3.4: Clasificación y tipo de vía.

Clasificación	Tipo de vía	Velocidad del tráfico rodado (km/h)
A	de alta velocidad	$v > 60$
B	de moderada velocidad	$30 < v \leq 60$
C	carriles bici	-
D	de baja velocidad	$5 < v \leq 30$
E	vías peatonales	$v \leq 5$

Fuente: *UNE-EN 13201-2:2016*. [36]

En este caso la clasificación según el lugar de estudio es de tipo D (de baja velocidad) por lo que la clase de alumbrado para esta clasificación es:

Tabla 3.5: Clase de alumbrado para vía tipo D

Situaciones de proyecto	Tipos de vías	Clase de Alumbrado
D1-D2	- Areas de parcamiento en autopista y autovías - Aparcamiento en general - Estaciones de autobuses Flujo de tráfico de ciclistas Alto Normal	CE1A / CE2 CE3 / CE4
D3-D4	- Calles residenciales suburbanas con aceras para peatones a lo largo de la calzada - Zonas de velocidad muy limitada Flujo de tráfico de peatones y ciclistas Alto Normal	CE2/ S1/ S2 S3/ S4

Fuente: *UNE-EN 13201-2:2016*. [36]

La clase S hace referencia a iluminancia horizontal sobre la área de la vereda y la clase CE hace referencia a iluminancia horizontal de vereda y vía a iluminar.

Una vez identificado la clase de alumbrado se puede conocer la iluminancia media (E_m), de acuerdo con el tipo de vía en el que se está estudiando de acuerdo a la Tabla 3.6

Tabla 3.6: Series CE de clase de alumbrado para vía tipo D

Clase de Alumbrado	Iluminacion horizontal	
	Iluminancia Media Em (lux)	Uniformidad media Um
CE0	50	0,40
CE1	30	0,40
CE1A	25	0,40
CE2	20	0,40
CE3	15	0,40
CE4	10	0,40
CE5	7,5	0,40

Fuente: *UNE-EN 13201-2:2016*: [36]

- Altura de montaje (H)

Se selecciona la altura de montaje correspondiente según el tipo de iluminación de la calzada verificando si la relación S/H es correcta donde (S=distancia entre postes, H=altura de montaje seleccionado). Ver Tabla 3.7

Tabla 3.7: Altura de montaje según flujo de luminaria

Iluminación	Altura (m)	Relación S/H	Disposición de luminarias	
			Criterio	Disposición
M1	12- 14	3.5- 4	Dos carriles de circulación	Unilateral
M2	10- 12	3.5- 4	Dos carriles de circulación	Unilateral
M3	8.5- 10	3.5- 4	Ancho de la calzada menor	Unilateral
M4	7- 9	3.5- 4	Unilateral	
M5	6	3.5- 4	A criterio del diseñador	

Fuente: *RTE INEN 069*. [37]

- Factor de mantenimiento (f_m)

Según las características de la vía, se selecciona el factor de mantenimiento (f_m) teniendo en cuenta índices de contaminación o tráfico alrededor de la vía.

Tabla 3.8: Valores de (f_m) según característica de vía

Características de la vía	Luminaria abierta	Luminaria cerrada
Limpia	0.75	0.80
Media	0.68	0.70
Sucia	0.65	0.68

Fuente: Barros (2006). [38]

- Factor de utilización (η)

El factor (η), se define como la división entre el flujo luminoso útil (el que toca la calzada), y el flujo luminoso difundido por la luminaria, este factor se simboliza por curvas, las cuales están en función (A/H):

$$\frac{A}{H} = \frac{\text{Ancho de vía}}{\text{Altura de instalación}} \quad (3.2)$$

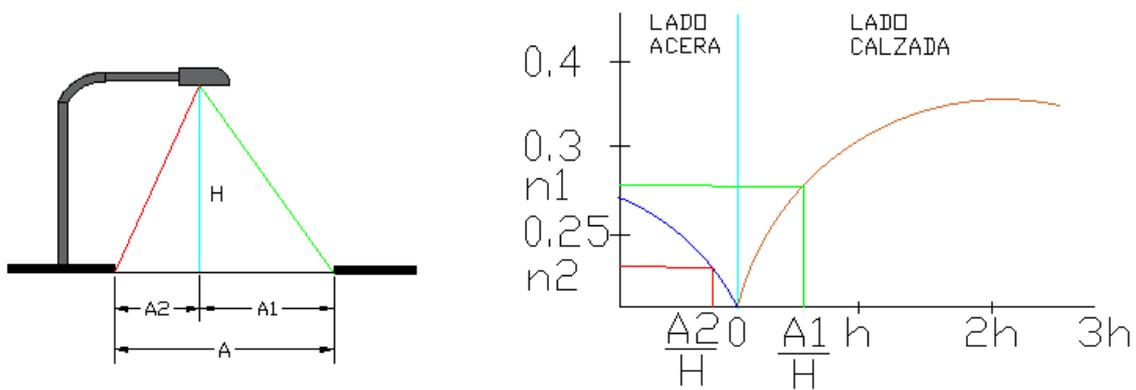


Figura 3.9: Función cociente (A/H).[Autores]

Con el dato de A (ancho de vía) y H (altura de montaje), se calcula $A2/H$ y $A1/H$ y según la curva del factor de utilización de la figura 3.9, se obtiene los valores de η_1 y η_2 :

$$A = A_1 + A_2 \quad (3.3)$$

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (3.4)$$

Luego se calcula el valor de la interdistancia entre poste y poste. Esta distancia se calcula de la fórmula de iluminancia media, donde se despeja (d) medido en metros quedando de la siguiente manera:

$$d = \frac{\eta * f_m * \Phi_L}{A * E_m} \quad (3.5)$$

Método de los nueve puntos.

Debido a la simetría de la vía, no es necesario calcular el valor de iluminancia en todos los puntos de la vía, sino que es suficiente con hacer el cálculo en un pequeño tramo de la vía, en cuadrantes representativos llamados dominios los cuales se dispersan según el tipo de distribución de las luminarias. La vía en la que se realizó este estudio tiene luminarias en disposición unilateral, por lo que la distribución de los nueve puntos queda según la figura 3.10

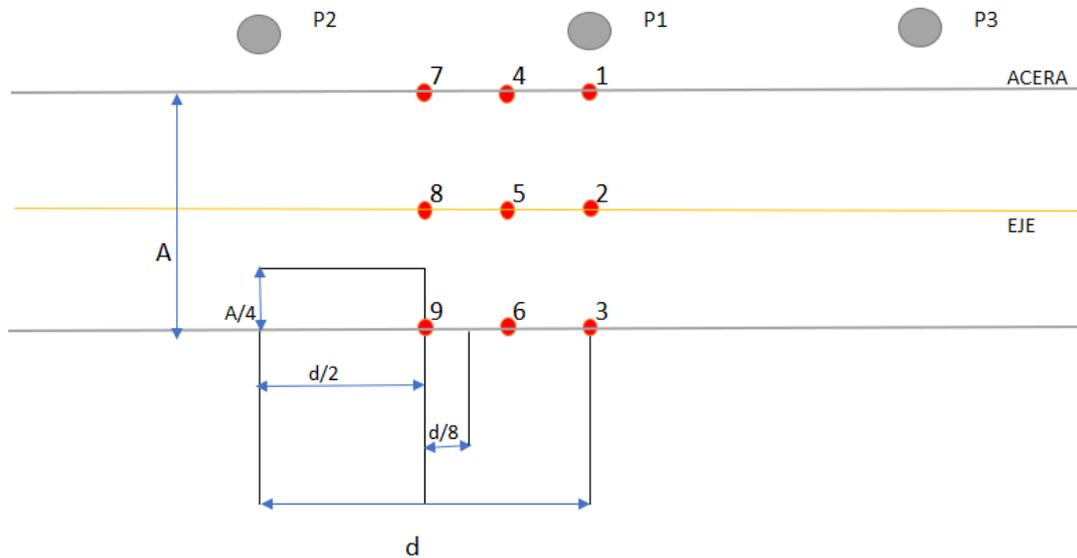


Figura 3.10: Distribución y medidas aplicando método de nueve puntos.[Autores]

Las medidas de distribución de los nueve puntos a partir del dato del ancho de vía (A) y la distancia entre poste y poste (d) donde se realizó la medición. Ver Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Medidas de distribución de los nueve puntos.

Datos		
d =	29	m
d/2 =	14.5	m
d/8 =	3.625	m
A =	7	m
A/4 =	1.75	m

Con los datos de la tabla anterior, se traza los nueve puntos sobre la calzada para realizar la medición, con el uso del luxómetro bajo las siguientes condiciones:

- Las mediciones se realizaron en dos etapas: encendidas y apagadas las luminarias, para evitar fuentes externas que aportan iluminación a la calzada.
- Al encender las luminarias, se debe esperar 10 minutos para su estabilización luego del encendido de las luminarias.
- Se toma nota del último valor indicado por el equipo para tener un valor más acertado de la medición.

Luego de un registro de datos, para encontrar el valor de iluminancia media E_m a partir de los datos medidos en el método anterior se usa la fórmula:

$$E_m = \frac{E_1 + 2E_2 + E_3 + 2E_4 + 4E_5 + 2E_6 + E_7 + 2E_8 + E_9}{16} \quad (3.6)$$

También se calculó los valores de la uniformidad global con la ecuación (3.7) y extrema (longitudinal) con la ecuación (3.8) quedando así:

$$U_o = \frac{E_{minima}}{E_m} \quad (3.7)$$

$$U_L = \frac{E_m}{E_{maxima}} \quad (3.8)$$

Con los valores antes calculados servirán para verificar si cumple las condiciones de iluminación según la regulación ARCERNNR 006/20 relacionado a la “Prestación del Servicio de Alumbrado Público General”

3.3.2 Medición de luminancia

La señalización de los puntos de medición a lo largo de la vía que comprende los tres postes debe tener una buena visualización durante las mediciones por lo que se trazó la malla en el asfalto.

La malla empleada para señalar los puntos de muestreo a lo largo de la vía que están las tres luminarias. Ver Figura 3.11

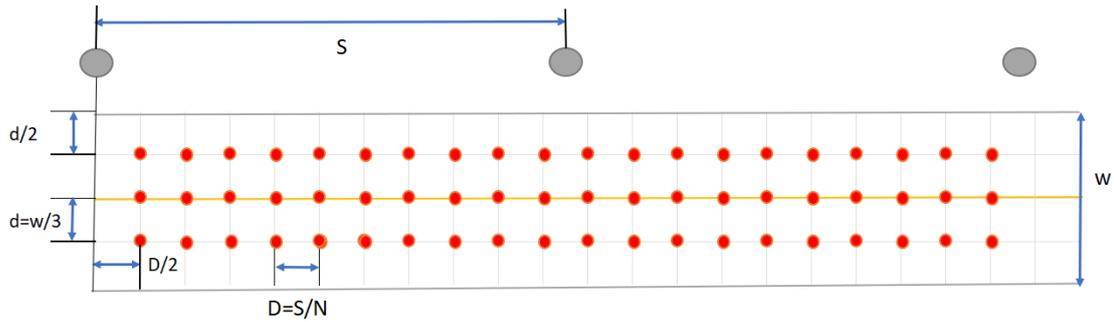


Figura 3.11: Malla de medición iluminancia y luminancia.[Autores]

La Tabla 3.10, muestra los diferentes valores de las distancias según el lugar donde se realizó la medición.

Tabla 3.10: Medidas de distribución de puntos para cálculo de luminancia

Datos		
S =	29	m
W =	7	m
d =	2.33	m
d/2 =	1.17	m
N =	10	m
D =	2.9	m
D/2 =	1.45	m

Una vez identificado los nueve puntos, se realizó las mediciones bajo las siguientes condiciones:

- Al realizar la medición con el equipo, el observador se sitúa a 60 m mirando en el sentido de circulación en la primera línea de puntos, el trípode con el equipo debe estar a una altura de 1,50 m.
- Las mediciones se realizaron en dos etapas, encendidas y apagadas las luminarias, para evitar fuentes luminosas externas a las luminarias.
- Antes de realizar las mediciones, se debe esperar 10 minutos para su estabilización luego del encendido de las luminarias.

Con los datos de las mediciones se calcula la luminancia promedio (L_{prom}) con la ecuación (3.9), el cual indica un valor promedio aritmético de valores de luminancia del tramo de vía que fue medido.

$$L_{prom} = \frac{\sum L_i}{n} \quad (3.9)$$

Donde:

L = Valor de luminancia en un punto exacto de medición.

N = Número total de puntos medidos.

También se calcula el valor de iluminancia promedio (E_{prom}) de la malla realizada mediante la formula:

$$E_{prom} = \frac{\sum E_i}{n} \quad (3.10)$$

Donde:

L = Valor de iluminancia en un punto exacto de medición.

N = Número total de puntos medidos.

3.3.3 Simulaciones en Dialux

La iluminancia y luminancia emitida por una luminaria se puede determinar por medio del software Dialux, donde se ingresan los parámetros como: tipo de vía, y la altura de instalación de luminaria. Realizando la simulación de iluminación para verificar los datos calculados y si cumplen con la Regulación ARCERNNR 006/20.

Las luminarias seleccionadas en este software fueron según su uso, potencia y flujo luminoso para que tenga una similitud a las luminarias usadas en la medición.

En el software Dialux para la simulación de la luminaria LED es el modelo LED PERFORMANCE STREET FX MD. Mientras que para la simulación de la luminaria de sodio es el modelo ASL 2060.

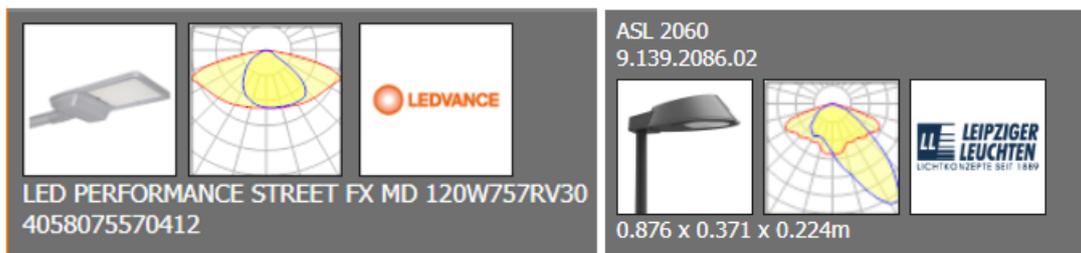


Figura 3.12: Luminarias usadas para simular en *DIALux evo*. [Autores]

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los diferentes resultados de mediciones y simulaciones obtenidos al aplicar la metodología y procedimientos descrita en el capítulo 3 a los dos tipos de luminarias sodio y LED.

La vía que se encuentra junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS sede Cuenca cuenta con tres postes de hormigón de 14 m con una distancia promedio de 29 m entre poste y poste lo cual servirán para el emplazamiento de las luminarias para las mediciones de los parámetros lumínicos.

A continuación, se describe la metodología realizada cumpliendo las diferentes condiciones de medición, para lo cual se ha empleado gráficas ilustrativas, diagramas de barras y tablas comparativas de cada tipo de luminaria para el análisis de los resultados obtenidos.

4.1 Ensayo en laboratorio

4.1.1 Luminarias seleccionadas

Mediante la Tabla 3.2 se observa que la relación F/E para luminaria LED es de 1,3 y para sodio de 0,65. Con el dato de flujo luminoso (lm) de la Tabla 3.1 se procede con el cálculo de lúmenes equivalentes (lm_{eq}).

$$lm_{eq}(VSAP) = lm * 0.65$$

$$lm_{eq}(VSAP) = 17000 * 0.65$$

$$lm_{eq}(VSAP) = 11.05 \text{ } lm_{eq}$$

$$lm_{eq}(LED) = lm * 2.15$$

$$lm_{eq}(LED) = 10000 * 2.15$$

$$lm_{eq}(LED) = 10.75 \text{ } lm_{eq}$$

El valor de lm_{eq} para sodio es de 11,05 y para LED de 10.75, comparando estos dos valores calculados no existe una gran diferencia entre uno y otro valor de lm_{eq} de las dos luminarias. Por lo que la luminaria Marca 1 de 150W puede ser sustituida por la luminaria LED Marca 2 de 100W LED para las mediciones respectivas.



Figura 4.1: Luminaria Marca 1 de 150W [Fuente: Autores.]



Figura 4.2: Luminaria Marca 2 de 100W [Fuente: Autores.]

4.1.2 Conexión del circuito de ensayo

Se realizó el circuito correspondiente de la Figura 3.1, la tensión tanto para fuente fija y fuente variable es de 110V en cada línea. Antes de realizar la medición se comprueba el correcto funcionamiento del analizador de redes y de las luminarias, además de la conexión de pinzas de tensión y corriente evitando cruce de cables. Las figuras 4.3 y 4.4 se observan el encendido correcto de las luminarias de cada tipo.



Figura 4.3: Comprobación de encendido Luminaria Marca 1 de 150W [Fuente: Autores.]



Figura 4.4: Comprobación de encendido Luminaria Marca 2 de 100W [Fuente: Autores.]

4.1.3 Configuración inicial de equipo de medida

Al encender el equipo Fluke 435-II, la primera configuración que se realiza es: idioma, frecuencia nominal, tensión nominal, fecha y hora. Todo debe estar correcto a la hora de realizar las mediciones y posterior descarga de datos sobre todo la tipología de conexión en el que se va a realizar en este caso es bifásica.

4.2 Análisis de perturbaciones eléctricas

Se analiza el efecto que producen los armónicos en los dos tipos de luminarias, se usaron 3 luminarias de sodio y tres luminarias tipo LED.

Luego, se examinaron los armónicos desde el tercer al noveno orden, según la norma IEEE std 519-2022. Además de la distorsión armónica total de tensión (THDv).

4.2.1 Análisis de armónicos

4.2.1.1 Análisis de armónicos con fuente fija

Los datos obtenidos corresponden a la medición de armónicos en entrada y salida del PCC, en el Software *Power Log Classic* mediante la visualización tipo histograma se obtiene los datos de THD, y orden de armónico.

De la Tabla 5.1 del Anexo 1, se puede visualizar que los datos tanto de entrada y de salida en una luminaria tipo LED la diferencia es muy poca por lo que se ha calculado los valores promedios para realizar el análisis respectivo. Ver Tabla 4.1

Tabla 4.1: Magnitudes armónicas (%) de luminaria LED con fuente fija.

LED 100W						
	1 encendida		2 encendidas		3 encendidas	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
THD (V)	11,55	11,10	11,60	11,30	11,20	11,25
THD (I)	13,30	46,80	14,45	48,90	23,80	73,50
H3 (V)	11,44	10,97	11,64	11,21	11,08	11,15
H3 (I)	13,27	46,43	14,37	47,73	23,63	72,33
H5 (V)	2,02	2,03	2,25	2,04	2,30	1,93
H5 (I)	1,51	0,00	1,73	0,00	2,00	0,00
H7 (V)	0,76	0,77	0,83	0,90	0,76	0,83
H7 (I)	0,38	0,00	0,50	0,00	1,22	0,00
H9 (V)	1,15	0,99	1,15	0,93	1,14	0,98
H9 (I)	0,93	0,00	0,85	0,00	2,55	0,00

Fuente: Autores.

Con los datos de la Tabla 4.1, se obtiene la Figura 4.5 en el que, mediante el diagrama de barras, se muestran los armónicos de voltaje y corriente. En los tres casos de encendido, el THDi y el H3 de corriente presentan valores muy elevados en la L2, y un aumento de distorsión armónica a medida que se incrementa en el circuito una luminaria más. Estos valores son verificados si cumplen con los límites de la normativa usada para este proyecto.

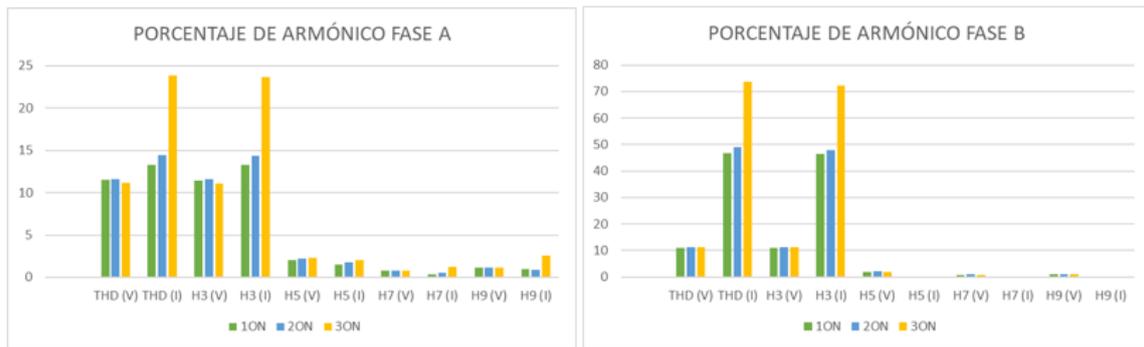


Figura 4.5: THD y orden de armónicos de luminaria LED en fuente fija.
Fuente: Autores.

En la Tabla 4.2 se verifica si los datos se rigen a los límites según la norma IEEE std 519-2022, aplicada a orden de armónicos de corriente y la regulación No. ARCERNNR-002/20 para el THD de voltaje. Donde se observa que el contenido armónico de corriente de la luminaria LED se encuentra dentro de los límites establecidos para la fase (A), en cambio en fase (B) no cumple con el tercer armónico (H3), En ambos casos de fase el valor de THD no cumple con el porcentaje armónico que es de 8.

Si bien es cierto que en las normas antes mencionadas no engloban THDi y armónicos de voltaje, se ha decidido estudiarla para a futuro realizar comparaciones por ejemplo con una luminaria de sodio.

Tabla 4.2: Magnitudes armónicas (%) de luminaria LED y límites de norma.

PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE A				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	11.55	11.60	11.20	8.00
H3	13.27✓	14.37✓	23.63✓	30.00
H5	1.51✓	1.73✓	2.00✓	10.00
H7	0.38✓	0.50✓	1.22✓	7.00
H9	0.93✓	0.85✓	2.55✓	5.00
PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE B				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	11.10	11.30	11.25	8,00
H3	46.43	47.73	72.33	30.00
H5	0,00✓	0,00✓	0,00✓	10.00
H7	0,00✓	0,00✓	0,00✓	7.00
H9	0,00✓	0,00✓	0,00✓	5.00

Fuente: Autores

Así también se realizó un análisis a la luminaria de sodio, según los datos de la tabla 5.2 del Anexo 1, se visualiza que no existe una considerable variación entre los datos de entrada y salida del PCC. Por lo que se obtuvo valores promedios para el análisis. Ver Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Magnitudes armónicas (%) de luminaria sodio con fuente fija.

SODIO 150W						
	1 encendida		2 encendidas		3 encendidas	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
THD (V)	11,10	11,10	11,25	11,20	10,65	10,25
THD (I)	24,3	23,9	25,2	24,55	26,85	27,25
H3 (V)	10,85	10,87	10,99	10,89	10,29	9,98
H3 (I)	14,60	14,31	16,30	15,54	15,40	15,07
H5 (V)	2,34	2,58	2,62	2,88	2,99	2,65
H5 (I)	15,34	15,17	14,18	13,91	16,74	17,23
H7 (V)	1,03	0,74	0,93	0,70	0,63	0,74
H7 (I)	6,05	6,22	6,21	6,21	5,92	6,37
H9 (V)	1,25	1,31	1,27	1,25	1,44	1,23
H9 (I)	1,10	1,34	1,19	1,29	1,39	1,49

Fuente: Autores

Con los datos de la tabla anterior se realizó el diagrama de barras, los armónicos de voltaje y corriente. Se observa que en los tres casos de encendido que el THDi es casi el doble del THDv y los porcentajes armónicos considerables son hasta (H7), mientras que (H9) presenta valores muy bajos. Ver Figura 4.6.

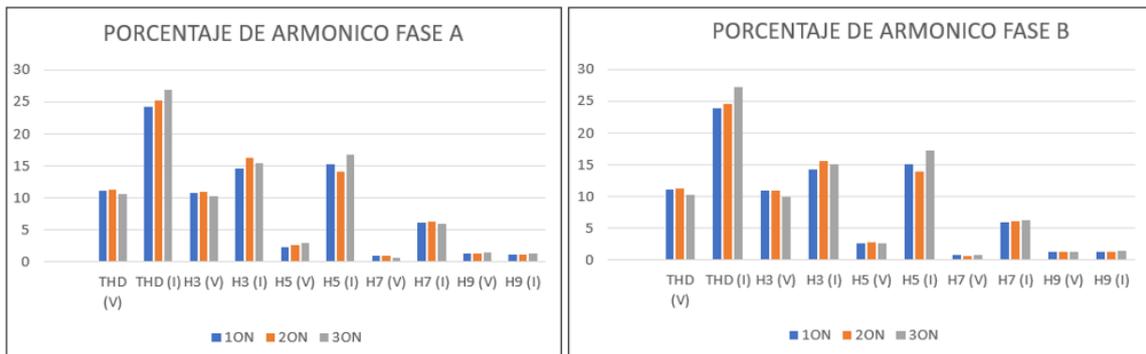


Figura 4.6: THD y orden de armónicos de luminaria sodio en fuente fija.

Así como se realizó la verificación de límites de armónicos con la luminaria LED, también se verifica para la luminaria de sodio a partir de los datos obtenidos en la medición.

Según la Tabla 4.4, se observa que al igual que en la luminaria LED el THD no cumple el límite de porcentaje indicado en la norma, además esta luminaria de sodio presenta niveles mucho más altos de distorsión armónica sobre todo en el orden cinco (H5) que esta fuera del límite y el armónico siete (H7) que está a solo a una unidad de la magnitud armónica límite que es de 7%.

Tabla 4.4: Magnitudes armónicas (%) de luminaria sodio y límites de norma.

PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE A				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	11.10	11.25	10.65	8.00
H3	14.60✓	16.30✓	15.40✓	30.00
H5	15.34	14.18	16.74	10,00
H7	6.05✓	6.22✓	5.92✓	7.00
H9	1.10✓	1.19✓	1.39✓	5.00
PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE B				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	11.10	11.20	10.25	8.00
H3	14.31✓	15.54✓	15.07✓	30.00
H5	15.17	13.91	17.23	10.00
H7	6.02✓	6.21✓	6.37✓	7.00
H9	1.34✓	1.29✓	1.49✓	5.00

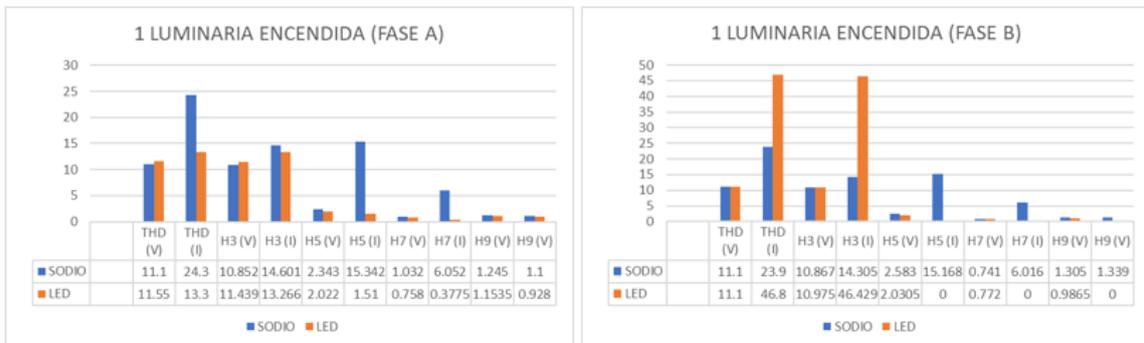
Fuente: Autores

Comparación de armónicos de luminaria sodio con LED.

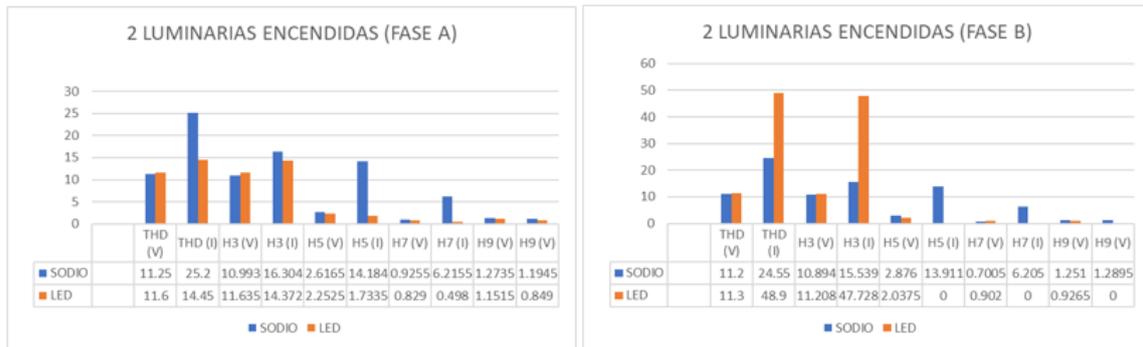
Una vez realizado un análisis individual se realiza una comparación entre las dos luminarias para así verificar que tipo de tecnología tiene más porcentaje armónico.

En la Figura 4.7, muestra que, en los tres casos de encendido, en la fase (A) los valores de armónicos de la luminaria sodio presentan un valor más elevado comparado con LED, el THDi tanto para sodio y LED aumenta a medida que se enciende una luminaria más, en cambio en fase (B) el THDi y el tercer armónico (H3) para LED presentan valores muy elevados a diferencia que en la fase (A).

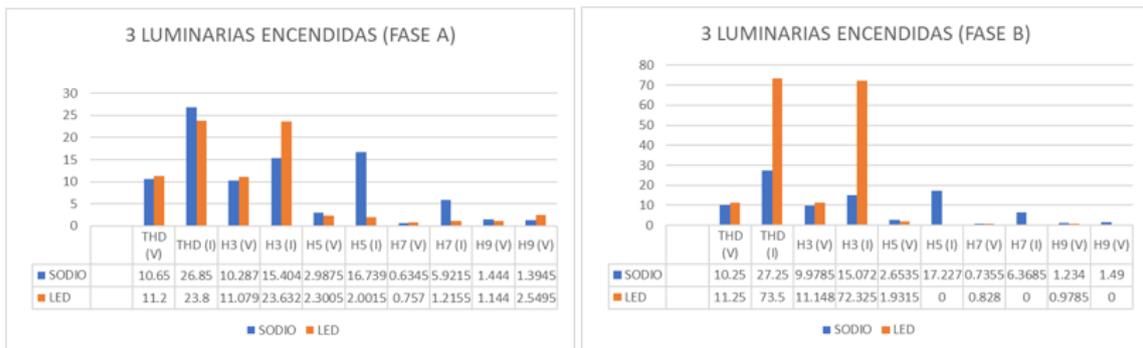
Además, en las dos fases, el quinto armónico (H5) de voltaje y corriente, en luminaria de sodio son mayores a la LED, en todos los casos de encendido. Al revisar el histograma de armónicos presentados en *Power Log Classic* muestran que la luminaria de sodio presenta más ordenes de armónicos a diferencia de la luminaria LED. El histograma y gráficos presentados fueron realizados en base a los datos de la Tabla 5.3 del Anexo 2.



a) Armónicos en una luminaria encendida en el circuito.



b) Armónicos en dos luminarias encendidas en el circuito.



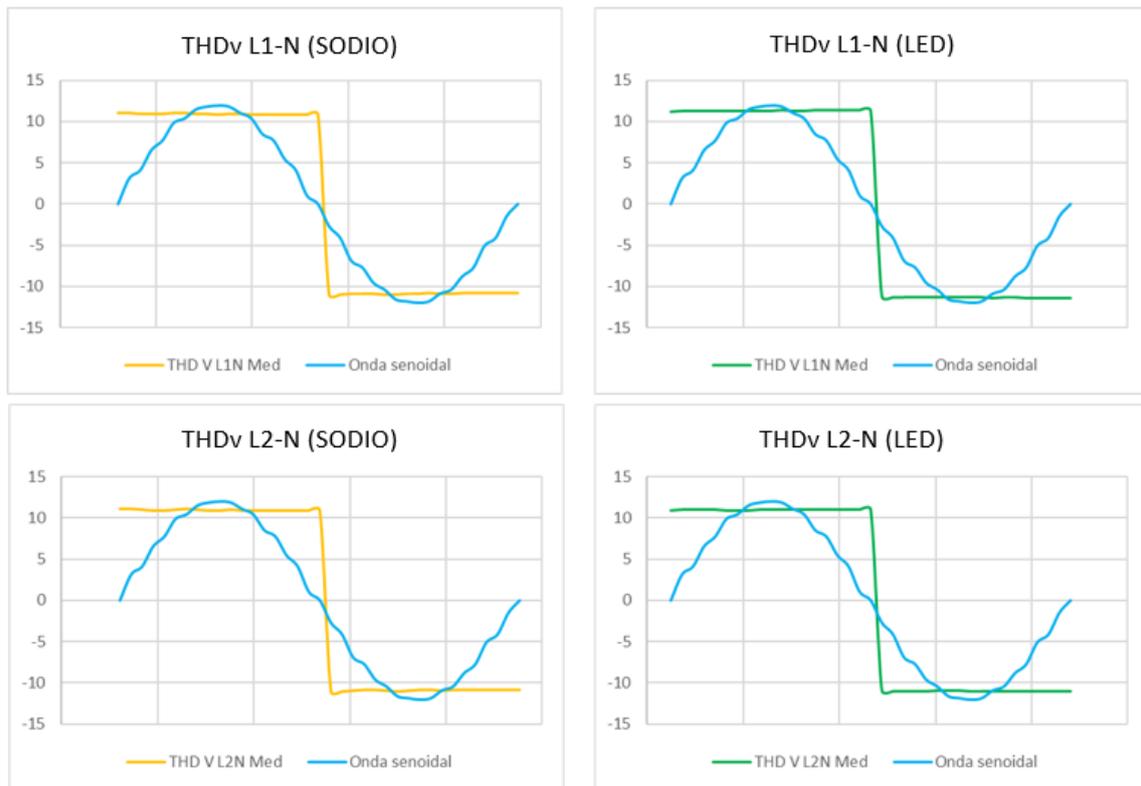
c) Armónicos en tres luminarias encendidas en el circuito.

Figura 4.7: Diferencia del THD y armónicos en luminaria sodio-LED con fuente fija.

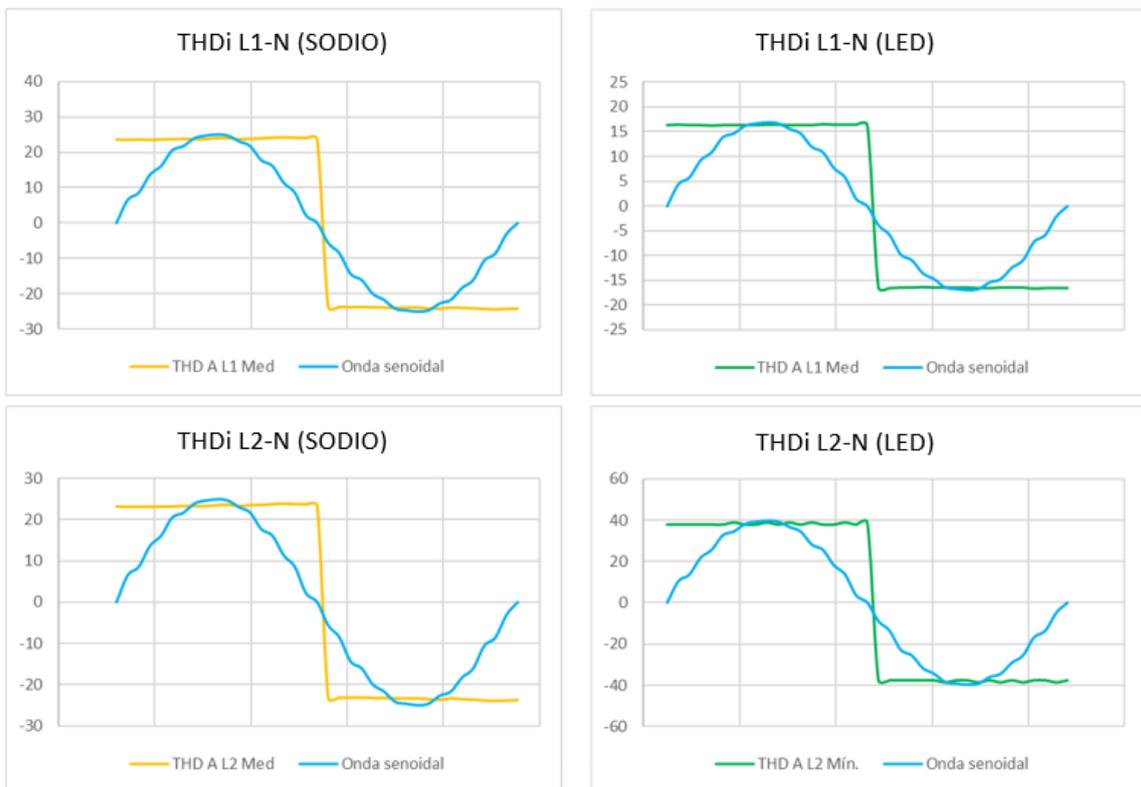
Análisis de distorsión de forma de onda con fuente fija.

En la Figura 4.8 se observa las ondas de distorsión TDH_v y THD_i con una luminaria encendida con una fuente fija para los porcentajes en TDH_v tanto para sodio como para LED en L1-N y L2-N los valores se encuentran en entre 11% y 12% para L1N de sodio el porcentaje es de 11% y en L1-N LED es 11,7% en el caso de L2-N para sodio el porcentaje es 11,1% siendo el más cercano al de la luminaria tipo LED con 11,2%, en cuanto al THD_i en L1 para sodio tiene un porcentaje de 24,3% siendo mayor a la luminaria LED que alcanza un 10%.

Finalmente en el THD_i para L2 en el caso de la luminaria de sodio se aproxima a la de la L1 con 23,9% y en la luminaria LED el porcentaje alcanza un 45,5% concluyendo así que el THD_i L1 es mayor en la luminaria de sodio pero en THD_i L2 es mayor la luminaria tipo LED.



a) Curva de THDv de una luminaria encendida en el circuito.

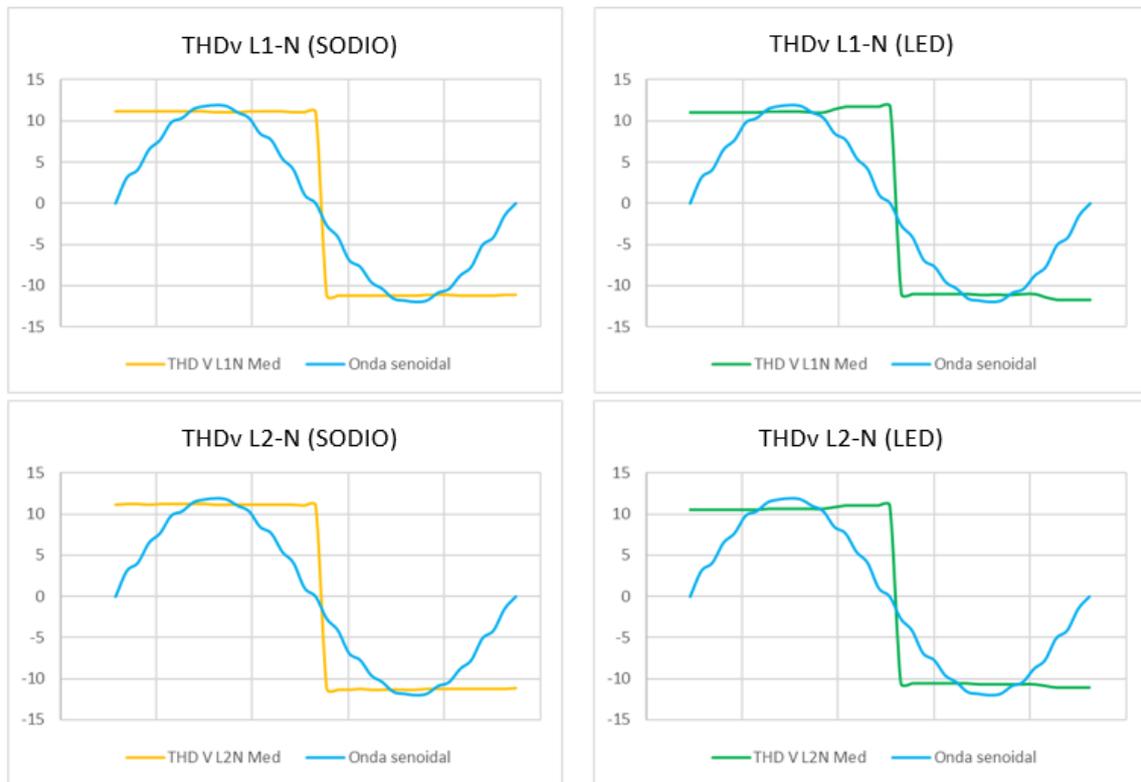


b) Curva de THDi de una luminaria encendida en el circuito

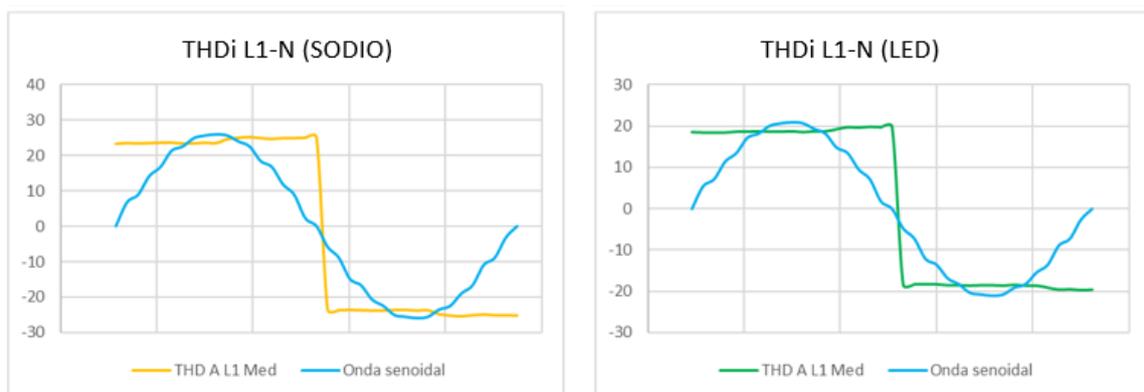
Figura 4.8: Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de una luminaria encendida con fuente fija (NA-LED).

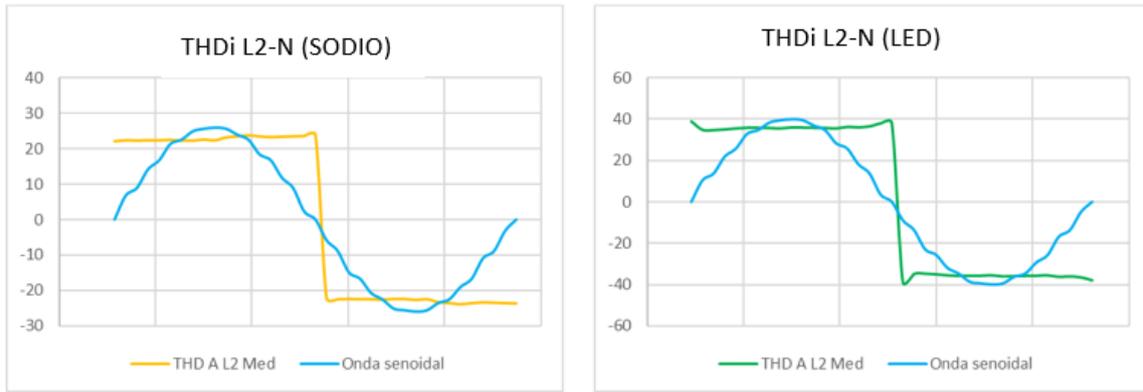
En la Figura 4.9 se observa las ondas de distorsión TDHv y THDi con 2 luminarias encendidas con fuente fija para los porcentajes en TDHv en L1-N es de 10,7% en la de sodio y 11,1% para la LED se asemeja a la L2-N con 10,6% en sodio y 11,1% en LED, en cuanto al THDi en L1 para sodio tiene un porcentaje de 23,7% siendo mayor a la luminaria LED que alcanza un 8.1%.

En el THDi para L2 en el caso de la luminaria de sodio se aproxima a la de la L1 con 23,9% y en la luminaria LED el porcentaje alcanza un 30,7% concluyendo así que el THDv en L1-N y L2-N es mayor en la luminaria LED, para los porcentajes de THDi en L1 es mayor en la luminaria de LED y para L2 es mayor la luminaria tipo LED.



a) Curva de THDv de dos luminarias encendidas en el circuito.

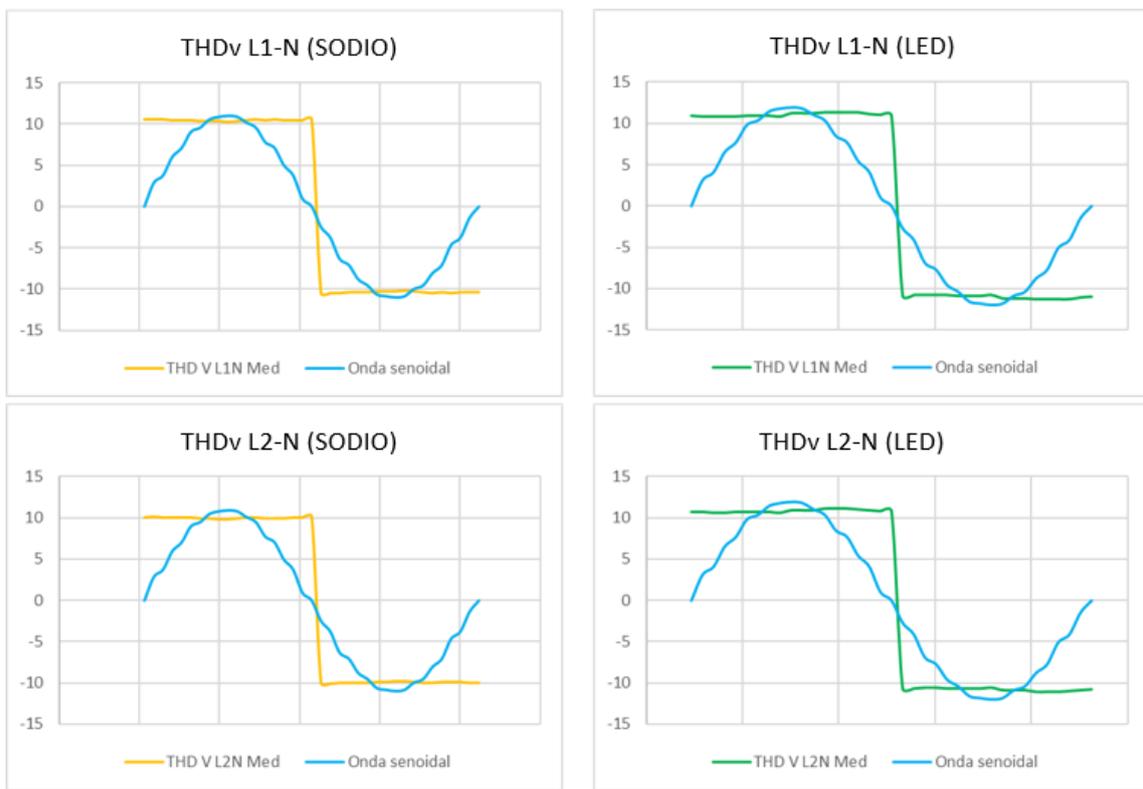




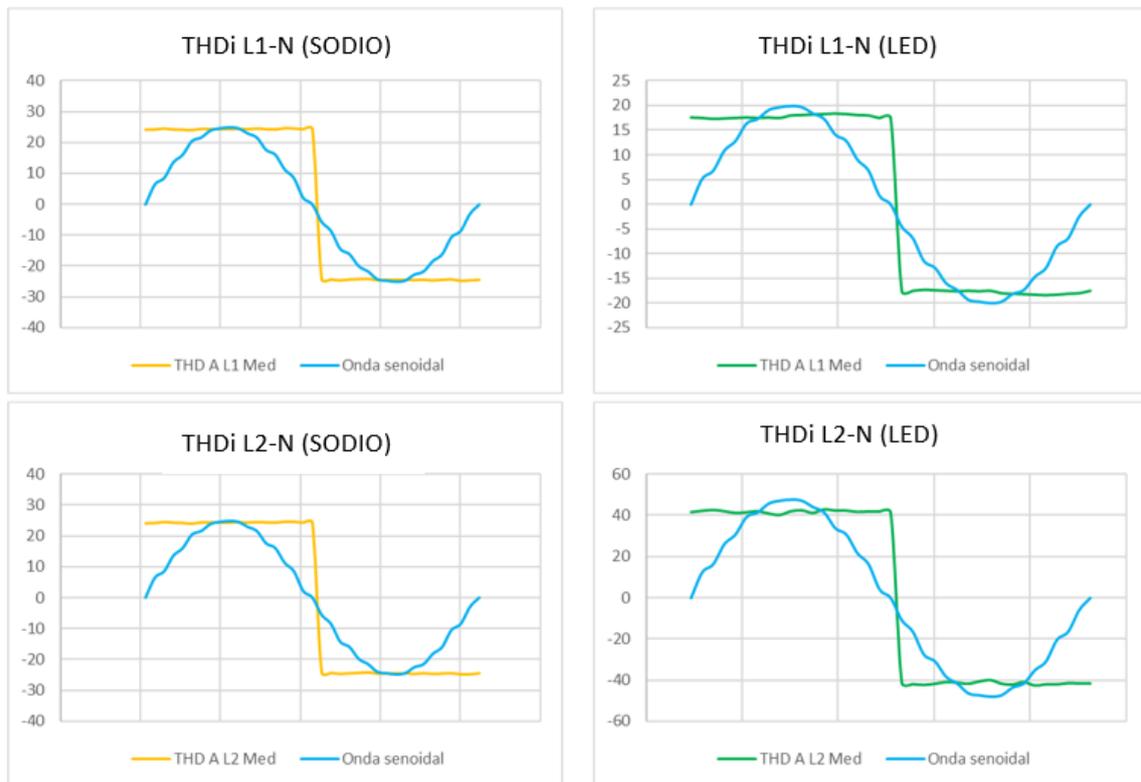
b) Curva de THDi de dos luminarias encendidas en el circuito.

Figura 4.9: Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de dos luminarias encendidas con fuente fija (NA-LED).

En la Figura 4.10 se observa las ondas de distorsión TDHv y THDi con 2 luminarias encendidas con fuente fija para los porcentajes en TDHv en L1-N es de 10,2% en la de sodio y 10,9% para la LED se asemeja a la L2-N con 9,7% en sodio y 10,8% en LED, en cuanto al THDi en L1 para sodio tiene un porcentaje de 28,6% siendo mayor a la luminaria LED que alcanza un 29.1% finalmente en el THDi para L2 en el caso de la luminaria de sodio se aproxima a la de la L1 con 29,3% y en la luminaria LED el porcentaje alcanza un 99,9% concluyendo así que el THDv en L1-N y L2-N es mayor en la luminaria LED, para los porcentajes de THDi en L1 es mayor en la luminaria de LED y para L2 es mayor la luminaria tipo LED.



a) Curva de THDv de tres luminarias encendidas en el circuito.



a) Curva de THDi de tres luminarias encendidas en el circuito.

Figura 4.10: Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de 3 luminarias encendidas con fuente fija (NA-LED).

Como se pudo apreciar en las curvas presentadas anteriormente los armónicos con mayor porcentaje se presentan en la luminaria tipo LED, para realizar una comparación se realizó el mismo procedimiento, pero con el uso de una fuente variable para realizar una comparación.

Las diferentes curvas fueron realizadas con los datos que se descarga del SoftPanel como ejemplo se muestra en la Tabla 5.4 del Anexo 3.

Las curvas obtenidas con el uso de una fuente variable se presentan en el siguiente procedimiento mostrado a continuación.

4.2.1.2 Análisis de armónicos con fuente variable CHROMA

La fuente de alimentación de CA programable Chroma permite al usuario programar el valor de tensión y frecuencia de salida y así simular las perturbaciones eléctricas. Para este estudio se simuló armónicos con el uso de esta fuente pura para verificar el nivel de perturbación y compararlo con los datos obtenidos con la fuente fija realizado anteriormente.

Los valores de programación para generar la perturbación en la forma de onda de salida se muestra contención:

Tabla 4.5: Valores de programación para la simulación de armónicos.

Orden armónico	Perturbación (%)	Ángulo de fase θ
3	11.56	0
5	2.01	0
7	0.79	0

Fuente: Autores

La forma de onda generada con la distorsión armónica de tensión programada con los parámetros ingresados se muestra en la Figura 5.3 del Anexo 4. Así mismo los valores de programación, valor de tensión de cada línea (L1) y (L2) y valor de la frecuencia (Hz), que muestra la pantalla del *SoftPanel*.

Luego de haber realizado la simulación se obtiene los datos de armónicos en entrada y salida del PCC, por medio del software *Power Log Classic*, se descarga los datos al PC obteniendo la Tabla 5.5 del Anexo 5. Para la luminaria LED se ha calculado los valores promedios entre los dos valores de entrada y salida para realizar el análisis.

Tabla 4.6: Magnitudes armónicas (%) de luminaria LED con fuente Chroma.

LED 100W						
	1 encendida		2 encendidas		3 encendidas	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
THD (V)	14,915	13,860	22,000	21,857	14,810	14,860
THD (I)	11,239	8,105	8,668	10,900	8,632	14,400
H3 (V)	10,962	10,980	9,991	11,351	10,486	10,489
H3 (I)	8,951	7,839	3,787	8,119	5,327	13,335
H5 (V)	1,748	1,828	1,754	1,790	1,868	1,917
H5 (I)	2,115	0,000	3,147	1,778	3,215	1,964
H7 (V)	0,548	0,545	0,553	0,548	0,604	0,591
H7 (I)	0,702	0,000	0,974	0,411	1,012	0,436
H9 (V)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
H9 (I)	0,358	0,000	0,350	0,286	0,489	0,366

Fuente: Autores.

Para una mejor visualización del comportamiento de armónicos se realiza el gráfico de diagrama de barras del porcentaje armónico de voltaje y corriente de cada fase usando la fuente Chroma, a partir de la Tabla 4.6

En la que se observa que tanto en fase (A) y fase (B), al encender una segunda luminaria los valores de porcentaje de armónicos aumentan, esto se da hasta encender una tercera luminaria donde los valores disminuyen hasta estabilizarse como si estuviera encendido una solo luminaria con una pequeña variación de los valores entre uno y otro encendido. Además, el armónico más contaminante es el tercero (H3), a partir de este orden los demás datos son muy pequeños por lo que se consideran valores despreciables. Ver Figura 4.11.

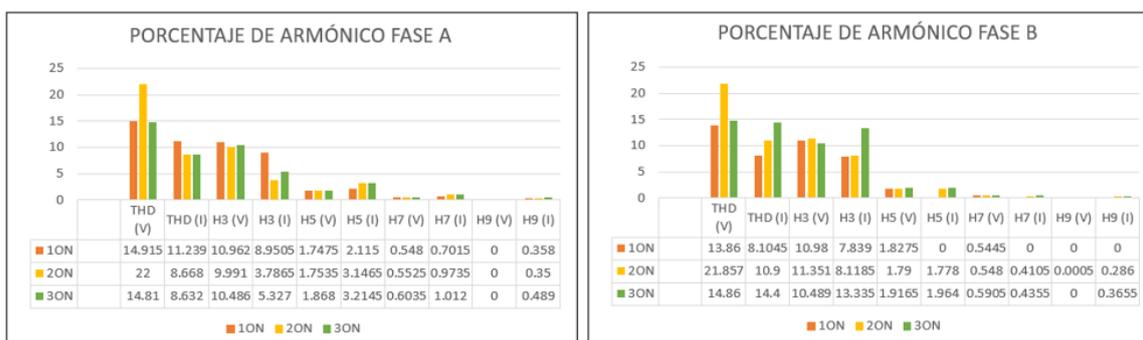


Figura 4.11: THD y orden de armónicos de luminaria LED con fuente chroma.

Se realizó la verificación de armónicos según la normativa con los datos obtenidos de la fuente variable Chroma, según la Tabla 4.7 se comprueba que el contenido armónico de corriente de la luminaria LED se encuentra dentro de los límites establecidos tanto para la fase A y B, a excepción del THD que supera el límite de porcentaje que es de 8%.

Tabla 4.7: Magnitudes armónicas (%) y límites de norma con fuente Chroma de luminaria LED.

PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE A				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	14.92	22,00	14.81	8.00
H3	8.95✓	3.79✓	5.33✓	30.00
H5	2.12✓	3.15✓	3.21✓	10.00
H7	0.70✓	0.97✓	1.01✓	7.00
H9	0.36✓	0.35✓	0.49✓	5.00
PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE B				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	13.86	21.86	14.86	8.00
H3	7.84✓	8.12✓	13.34✓	30.00
H5	0,00	1.78✓	1.96✓	10.00
H7	0,00	0.41✓	0.44✓	7.00
H9	0,00	0.29✓	0.37✓	5.00

Fuente: Autores

Según la Tabla 4.8 al analizar los tres tipos de encendido en luminaria de sodio se observa que a medida que se enciende una luminaria más, los valores de porcentaje armónico de voltaje y corriente incrementan su valor.

Tabla 4.8: Datos de armónicos de luminaria sodio con fuente fija

SODIO 150W						
	1 encendida		2 encendidas		3 encendidas	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
THD (V)	11,469	11,472	11,449	11,308	12,575	12,800
THD (I)	13,663	12,331	16,027	16,812	16,525	15,360
H3 (V)	11,346	11,459	11,461	11,474	11,878	11,710
H3 (I)	7,834	6,512	11,709	11,278	13,991	13,767
H5 (V)	2,070	2,074	2,045	2,047	8,732	2,612
H5 (I)	8,441	8,500	8,855	8,997	9,438	9,449
H7 (V)	0,709	0,718	0,748	0,716	0,820	0,785
H7 (I)	5,395	5,689	3,869	4,023	2,956	3,000
H9 (V)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H9 (I)	0,418	0,415	0,375	0,444	0,318	0,480

Fuente: Autores

En la Figura 4.12 se observa que, en los tres casos de encendido, el armónico más relevante es el (H3) y (H7).

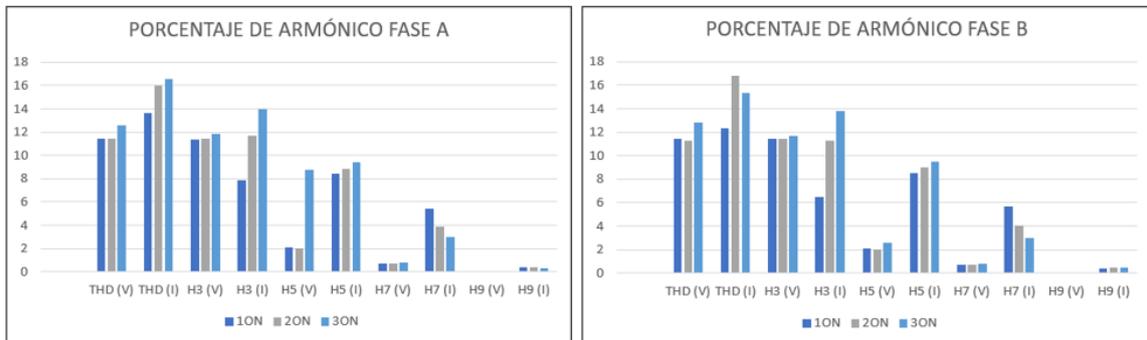


Figura 4.12: THD_v, THD_i, orden de armónicos de luminaria de sodio con fuente chroma

Al comprobar los límites según la normativa, la luminaria de sodio cumple con los límites de distorsión armónica de corriente en las dos fases a excepción del valor del THD. Ver Tabla 4.9

Comparación de armónicos de luminaria sodio con LED en fuente variable Chroma.

En la Figura 4.13, se observa los armónicos presentes en cada caso de encendido comparada entre las dos luminarias. En los tres casos las dos fases los valores de la luminaria de sodio presentan un valor más elevado a la luminaria de LED.

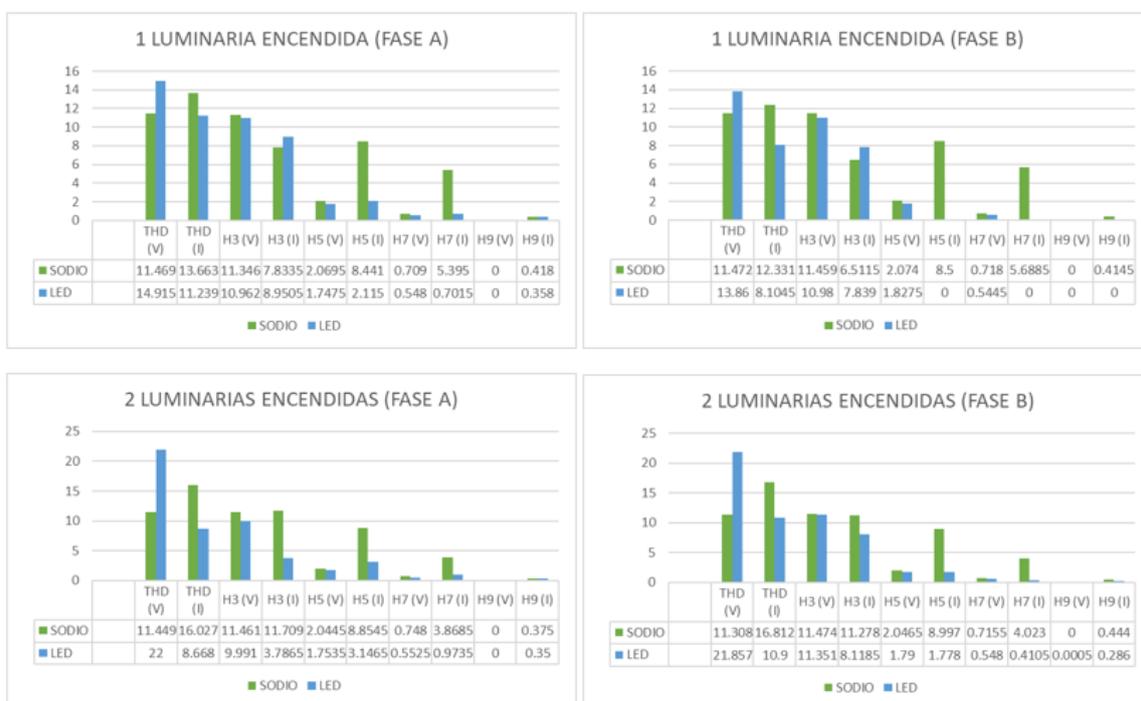
Tabla 4.9: Magnitudes armónicas (%) y límites de norma con fuente Chroma de luminaria sodio

PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE A				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	11.47	11.45	12.58	8.00
H3	7.83✓	11.71✓	13.99✓	30.00
H5	8.44✓	8.85✓	9.44✓	10.00
H7	5.40✓	3.87✓	2.96✓	7.00
H9	0.42✓	0.38✓	0.32✓	5.00
PORCENTAJE DE ARMÓNICO FASE B				
	1ON	2ON	3ON	NORMA
THD	11.47	11.31	12.80	8.00
H3	6.51✓	11.28✓	13.77✓	30.00
H5	8.50✓	9.00✓	9.45✓	10.00
H7	5.69✓	4.02✓	3.00✓	7.00
H9	0.41✓	0.44✓	0.48✓	5.00

Fuente: Autores

Además, en el histograma de armónicos del *Power Log Classic*, el tercer armónico (H3) sobresale en los tres casos de encendido ya sea con luminaria sodio o LED, siendo (H3) el más contaminante ya que los de otro orden presentan valores muy bajos.

Este histograma y los gráficos presentados fueron realizados en base a los datos de la Tabla 5.7 del Anexo 6.



a) Armónicos en una y dos luminarias encendidas en el circuito.

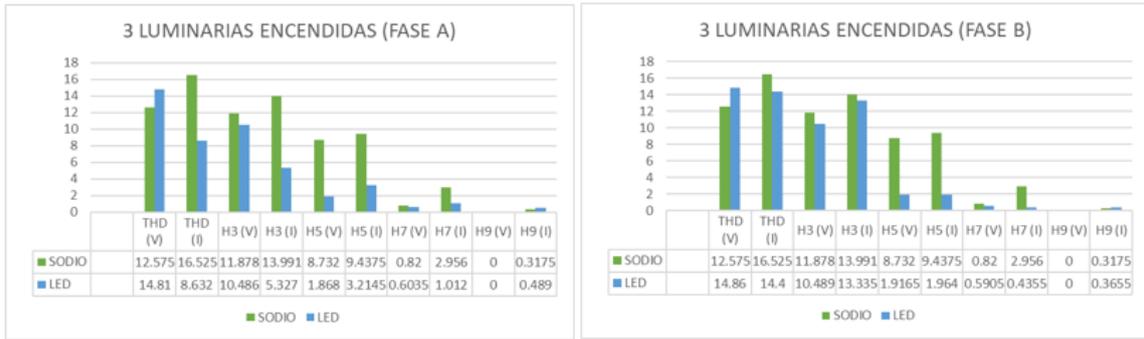


Figura 4.13: Diferencia del THD y armónicos en luminaria sodio-LED con fuente variable Chroma

b) Armónicos en tres luminarias encendidas en el circuito.

Comparación de armónicos entre fuente fija y fuente variable Chroma.

Los resultados encontrados en caso de encendido con respecto a la fuente que esta alimentada la luminaria se muestran en la Tabla 5.8 del Anexo 7, donde se calculó la suma de porcentaje armónico para ver el aumento o disminución en cada fuente.

Tabla 4.10: Sumatoria de porcentaje armónico en cada tipo de fuente para luminaria sodio y LED.

	LED					
	Fase (A)			Fase (B)		
	1 ON	2 ON	3 ON	1 ON	2 ON	3 ON
Fuente Fija (%)	56	59	79	119	123	171
Fuente Variable (%)	52	51	46	43	57	58
	SODIO					
	Fase (A)			Fase (B)		
	1 ON	2 ON	3 ON	1 ON	2 ON	3 ON
Fuente Fija (%)	88	90	92	87	89	92
Fuente Variable (%)	61	66	77	59	67	77

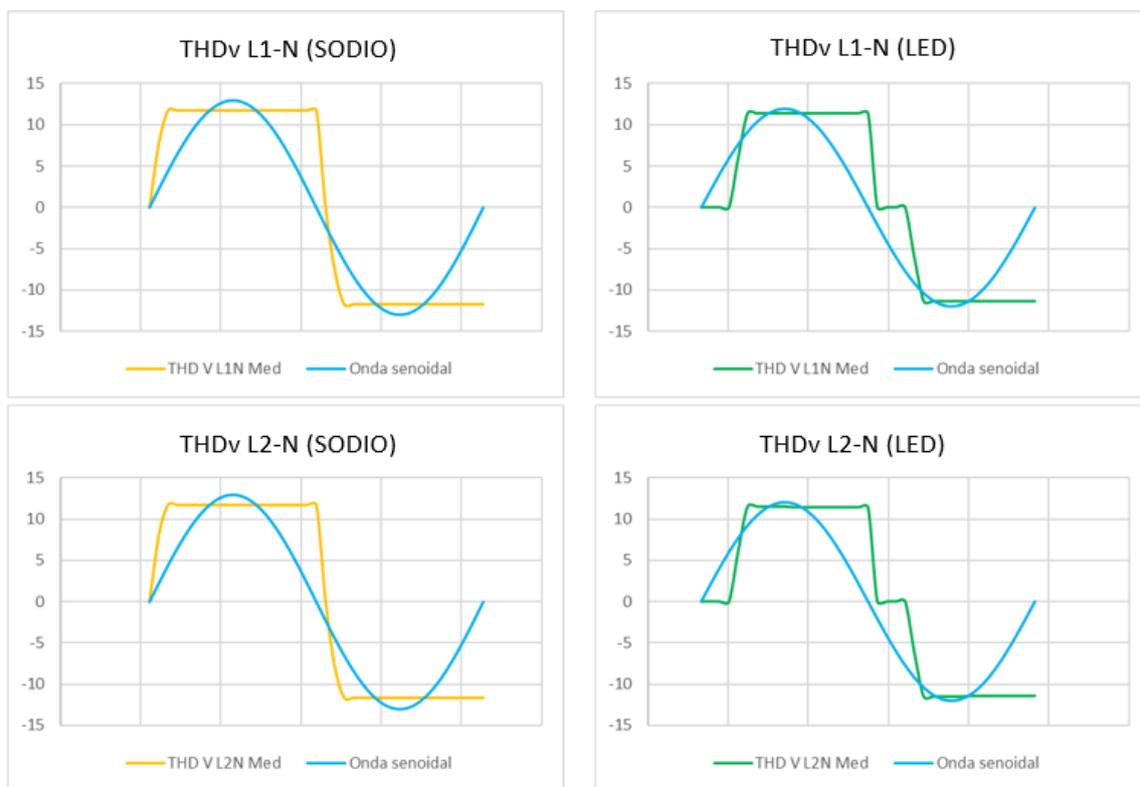
Fuente: Autores

Se puede apreciar que, en fuente fija, a medida que se enciende una luminaria LED el porcentaje armónico aumenta en ambas fases. En cambio, en fuente variable Chroma se mantiene en promedio los valores en los tres casos de encendido, es decir no existe un aumento o disminución considerable de los porcentajes armónicos.

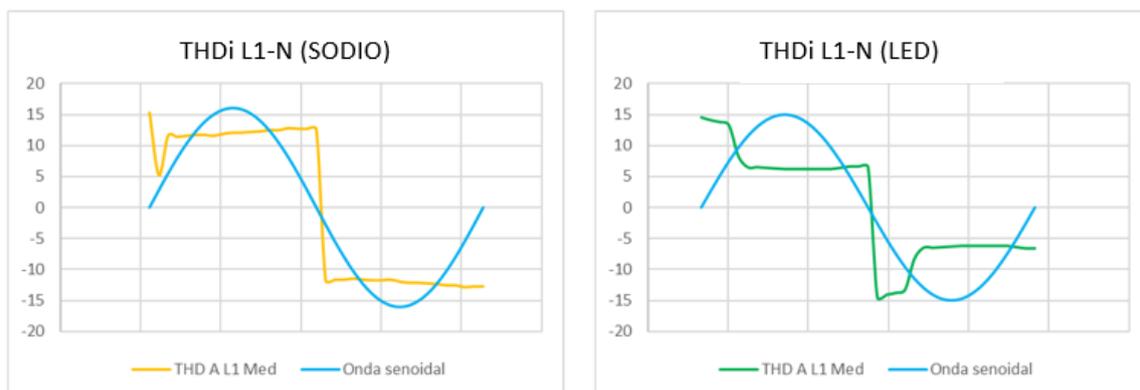
A diferencia con la luminaria tipo sodio que tanto para fuente fija como variable Chroma y en los tres casos de encendido el porcentaje armónico aumenta a medida que se enciende una luminaria más.

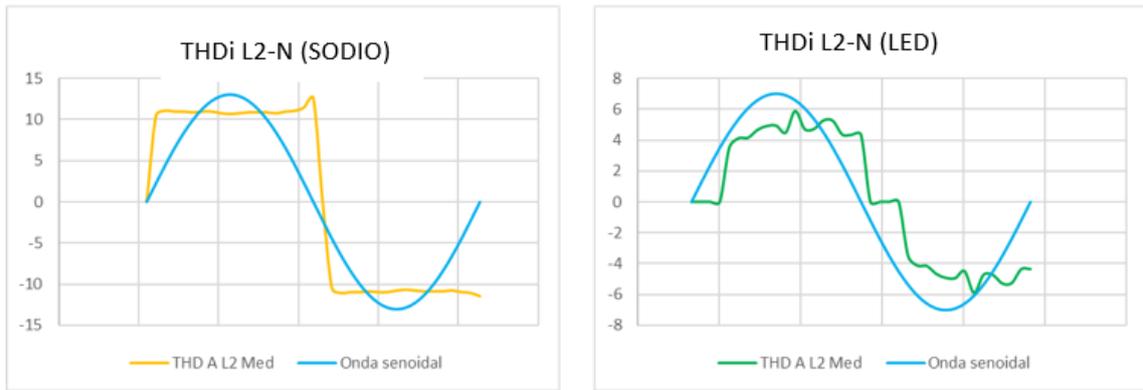
Análisis de distorsión de forma de onda con fuente variable Chroma.

En la figura 4.14 se observa las ondas de distorsión TDHv y THDi con 2 luminarias encendidas con fuente Chroma para los porcentajes en TDHv en L1-N es de 11,5% en la de sodio y 18,43% para la led, en el caso de la L2-N con 11,5% en sodio y 16,21% en LED, en cuanto al THDi en L1 para sodio tiene un porcentaje de 11,98% siendo mayor a la luminaria LED que alcanza un 7,94% finalmente en el THDi para L2 en el caso de la luminaria de sodio se aproxima a la de la L1 con 12,5% y en la luminaria LED el porcentaje alcanza un 10,32% concluyendo así que el THDv en L1-N y L2-N es mayor en la luminaria LED, para los porcentajes de THDi en L1 es mayor en la luminaria de sodio y para L2 es mayor la luminaria tipo sodio.



a) Curva de THDv de una luminaria encendida en el circuito.

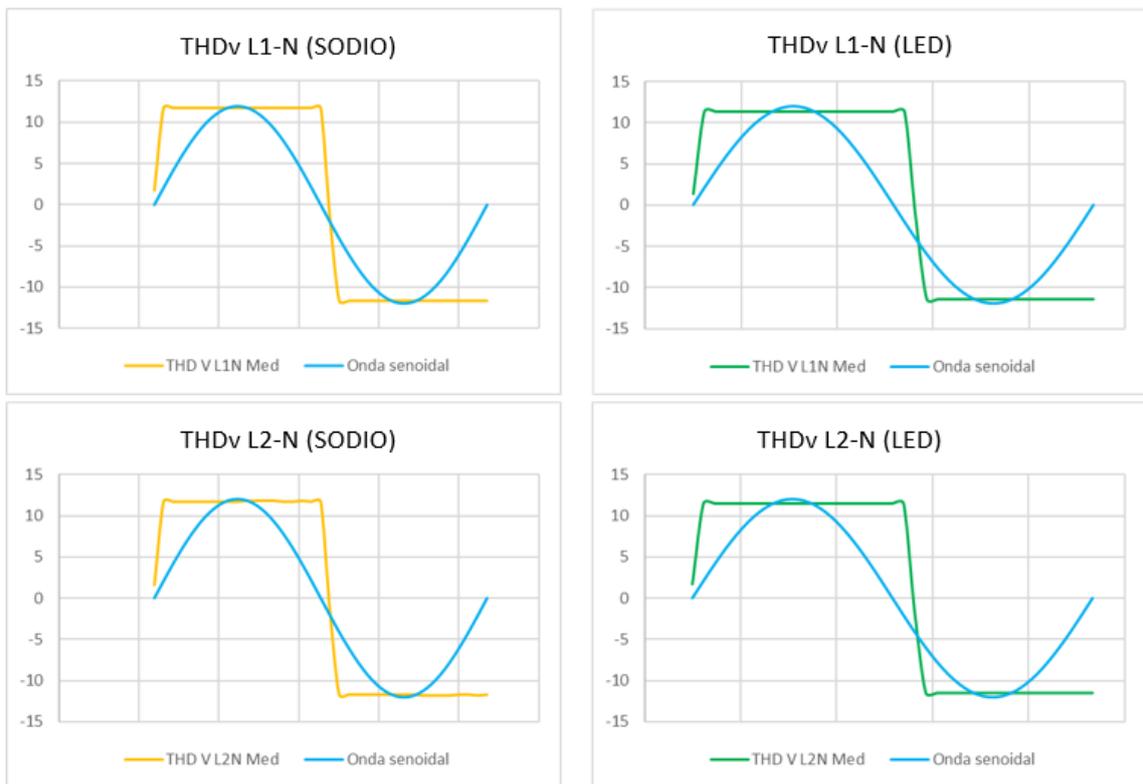




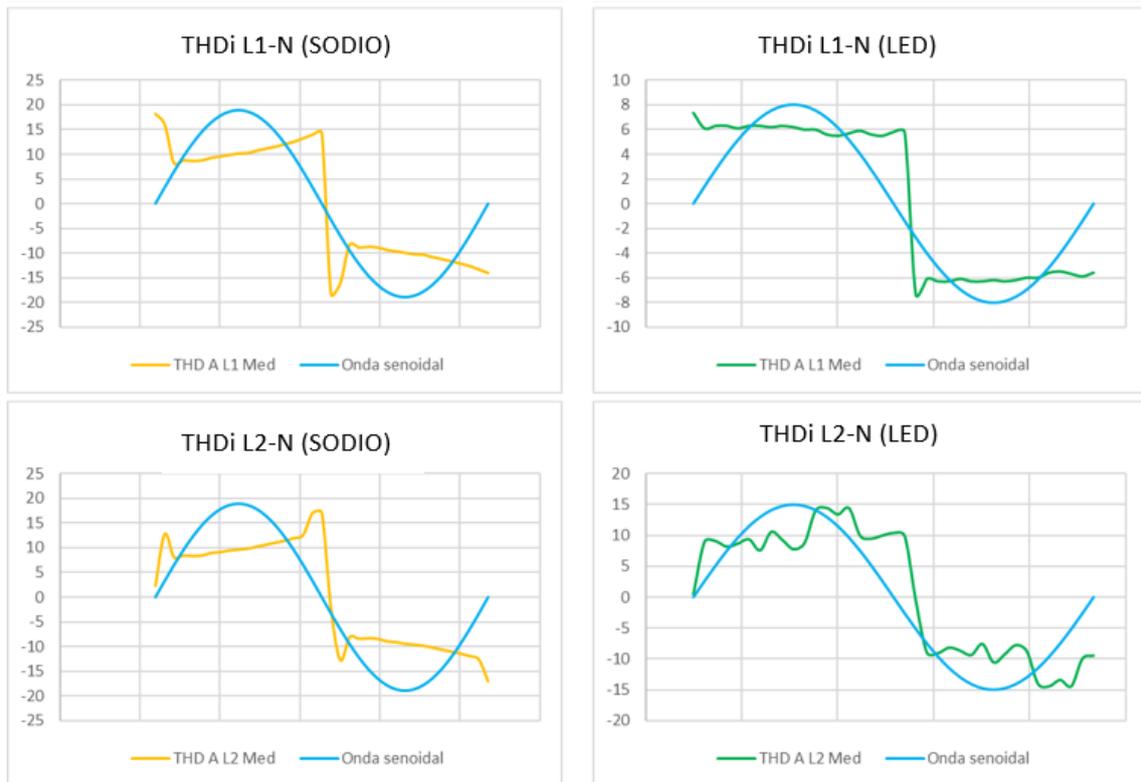
b) Curva de THDi de una luminaria encendida en el circuito.

Figura 4.14: Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de una luminaria encendida con fuente Chroma (NA-LED).

En la Figura 4.15 se observa las ondas de distorsión TDHv y THDi con 2 luminarias encendidas con fuente Chroma para los porcentajes en TDHv en L1N es de 11,7% en la de sodio y 32,6% para la LED, en el caso de la L2-N con 11,8% en sodio y 32,21% en LED, en cuanto al THDi en L1 para sodio tiene un porcentaje de 13,81% siendo mayor a la luminaria LED que alcanza un 9,98% finalmente en el THDi para L2 en el caso de la luminaria de sodio se aproxima a la de la L1 con 13,55% y en la luminaria LED el porcentaje alcanza un 7,4% concluyendo así que el THDv en L1-N y L2-N es mayor en la luminaria LED, para los porcentajes de THDi en L1 Y L2 es mayor en la luminaria de sodio.



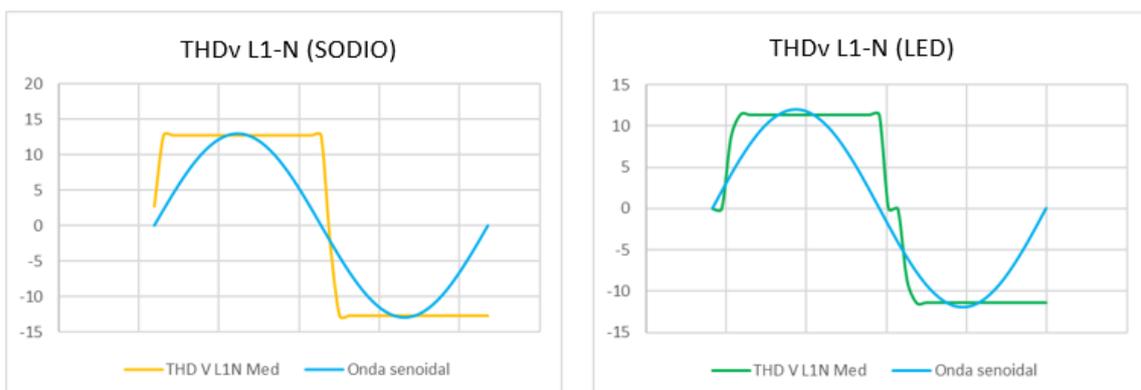
a) Curva de THDv de dos luminarias encendidas en el circuito.

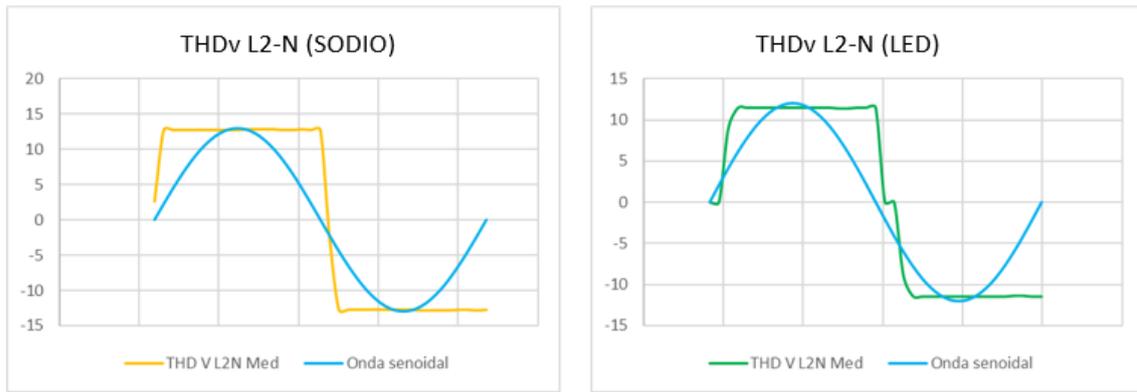


b) Curva de THDi de dos luminarias encendidas en el circuito.

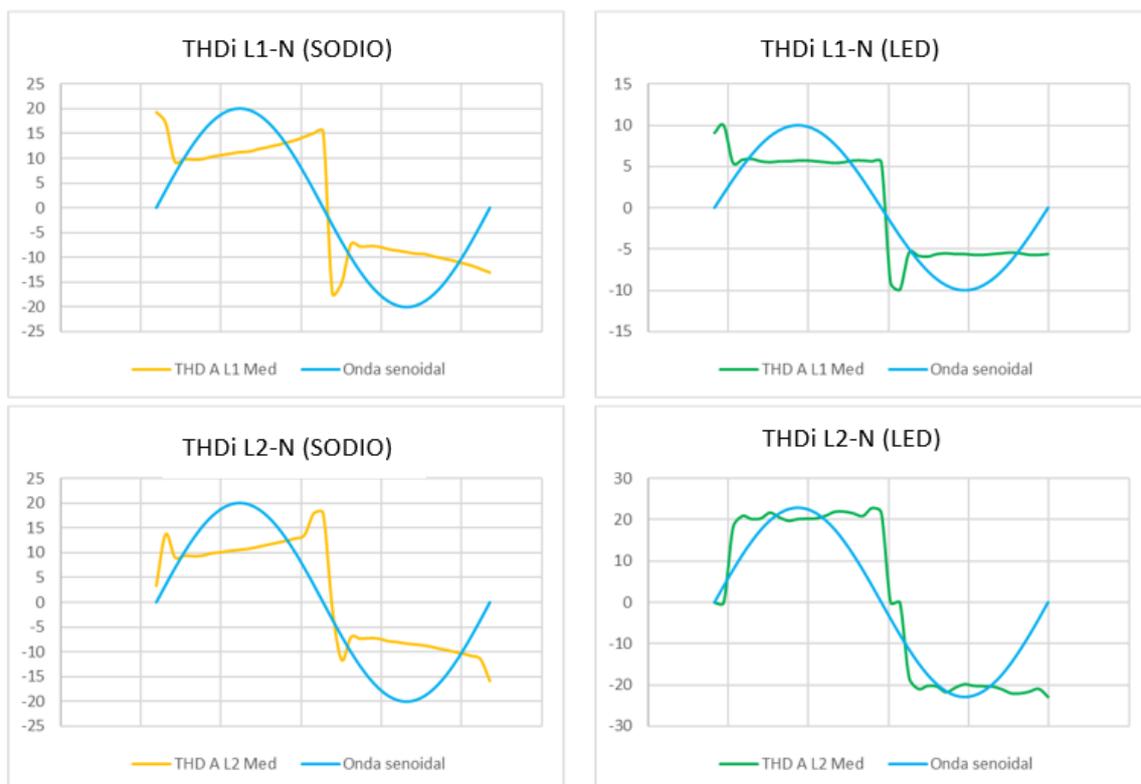
Figura 4.15: Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de dos luminarias encendidas con fuente Chroma (NA-LED).

En la Figura 4.16 se observa las ondas de distorsión TDHv y THDi con 2 luminarias encendidas con fuente Chroma para los porcentajes en TDHv en L1-N es de 12,7% en la de sodio y 18,22% para la LED, en el caso de la L2-N con 12,8% en sodio y 18,22% en LED, en cuanto al THDi en L1 para sodio tiene un porcentaje de 13,81% siendo mayor a la luminaria LED que alcanza un 7,34% finalmente en el THDi para L2 en el caso de la luminaria de sodio se aproxima a la de la L1 con 12,7% y en la luminaria LED el porcentaje alcanza un 6,6% concluyendo así que el THDv en L1-N y L2-N es mayor en la luminaria LED, para los porcentajes de THDi en L1 y L2 es mayor en la luminaria de sodio.





a) Curva de THDv de tres luminarias encendidas en el circuito.



b) Curva de THDi de tres luminarias encendidas en el circuito.

Figura 4.16: Formas de onda distorsionadas THDv y THDi de 3 luminarias encendidas con fuente Chroma (NA-LED).

Como se observa en las figuras anteriores, la forma de onda generada por armónicos usando una fuente variable Chroma no presenta mayores oscilaciones debido a que es una fuente pura, pero si existe una oscilación de diferencia entre los dos tipos de luminarias.

En la Tabla 5.9 del Anexo 8, se presenta un ejemplo de los diferentes valores obtenidos en la medición que se descargan a través del SoftPanel y empleados para realizar las curvas mostradas anteriormente.

4.2.2 Análisis de Flickers

La segunda perturbación por analizar son las fluctuaciones de tensión o conocidos como Flicker, que al igual que en armónicos se midió datos de entrada y salida del PCC.

La evaluación de severidad del flicker se expresa por P_{st} (corta duración) obtenida en un intervalo de tiempo de 10 minutos, el P_{lt} en cambio es una medida a largo plazo. Debido a que este parámetro P_{lt} se mide en un periodo de 2 horas se ha excluido de la medición por lo que se agrega al estudio el P_{st} de 1 minuto que es un parámetro de percepción a corto plazo del flicker y el instrumento utilizado puede medir este parámetro y así realizar comparaciones de esta perturbación en los dos tipos de luminarias.

4.2.2.1 Análisis de Flickers con fuente fija

De la Tabla 5.10 del Anexo 9, se puede visualizar que los datos tanto de entrada y de salida en una luminaria tipo LED la diferencia es muy poco por lo que se ha calculado los valores promedios para realizar el análisis respectivo.

Tabla 4.11: Severidad de flicker de luminarias con fuente fija.

		LED	SODIO
1 luminaria encendida	Pst (L1)	0.409	0.495
	Pst (L2)	0.457	0.503
	Pst_1min (L1)	0.528	0.553
	Pst_1min (L2)	0.551	0.641
2 luminarias encendidas	Pst (L1)	0.4025	0.460
	Pst (L2)	0.473	0.516
	Pst_1min (L1)	0.4025	0.574
	Pst_1min (L2)	0.473	0.601
3 luminarias encendidas	Pst (L1)	1.093	0.539
	Pst (L2)	0.972	0.617
	Pst_1min (L1)	1.992	0.592
	Pst_1min (L2)	1.7095	0.693

Fuente: Autores

En la Tabla 4.11 se realiza los gráficos de barras para una mejor visualización del comportamiento de datos entre luminarias, en el cual en LED el valor de P_{st} en ambas fases se mantienen hasta dos luminarias encendidas, con una tercera luminaria sus valores incrementa tanto en P_{st} como $P_{st_{1min}}$.

En luminarias de sodio los diferentes valores tienen una similitud entre sí, en la Figura 4.17 se aprecia que a medida que se enciende una luminaria los valores de P_{st} incrementan.



Figura 4.17: Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente fija en 3 casos de encendido.

Además, en luminarias tipo LED el flicker tiene mayor presencia ya que pueden llegar hasta el valor de 2 en P_{st} , a diferencia de las de sodio que su valor máximo es 0.7 el índice de severidad.

Verificación del nivel de compatibilidad para parpadeo.

Según la norma IEEE std 1453-2022 relacionado a flickers en sistemas de alimentación de CA, el cual debe cumplir el 0.9 de compatibilidad en niveles de parpadeo para sistemas en baja tensión.

Por lo que según la Tabla 4.11 para luminaria tipo sodio cumple con el límite establecido de 0.9 en los tres casos de encendido. Pero en LED cumple solo hasta encender dos luminarias ya que al encender una tercera los valores de flicker sobrepasan el límite en ambas fases.

Comparación de flickers de luminaria sodio con LED en fuente fija.

Una vez realizado un análisis individual se realiza una comparación entre las dos luminarias para así verificar que tipo de tecnología tiene más severidad de parpadeo.

En la Figura 4.18, muestra que en los dos casos de encendido, en ambas fases los valores de parpadeo para luminaria de sodio es mayor a la LED tanto en P_{st} y P_{st1min} . Pero esto cambia al encender tres luminarias donde los valores de flicker son mayores en luminaria tipo LED.

Según las capturas de pantalla del Fluke del Anexo 9, que se obtuvieron al momento de realizar la medición se muestra que la luminaria de sodio presenta más severidad de flicker a diferencia de la luminaria LED.

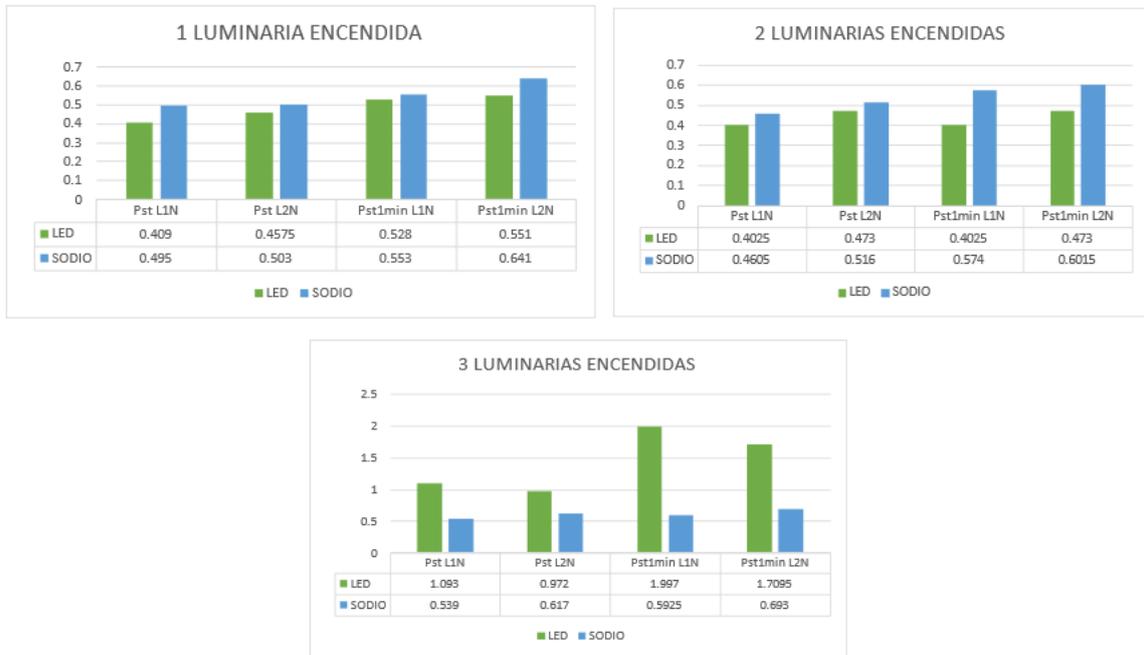


Figura 4.18: Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente fija.

4.2.2.2 Análisis de Flickers con fuente variable Chroma

En la Tabla 4.12, se detalla valores de los parámetros en las distintas secuencias para realizar la programación en el *SoftPanel de Chroma*.

Tabla 4.12: Valores de entrada para la programación del flicker.

Parámetro	Secuencia 0	Secuencia 1	Secuencia 2
Degree	0	0	0
Vac_Start (V)	120	100	125
Vac_end (V)	114	90	117
F_Start (Hz)	60	50	15
F_end (Hz)	20	40	15
Time (ms)	75	25	100

Fuente: Autores

El detalle de la forma de onda programada con los datos ingresados en la pantalla *List Mode* se observa en la Figura 5.7 del Anexo 9.

Luego de haber realizado la simulación se obtiene los datos de flickers en entrada y salida del PCC, por medio del software *Power Log Classic*, se descarga los datos al PC obteniendo los datos de P_{st} y Pst_{1min} . Ver Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Severidad de flicker de luminarias con fuente variable Chroma.

		LED	SODIO
1 luminaria encendida	Pst (L1)	8.099	0.642
	Pst (L2)	5.695	0.865
	Pst_1min (L1)	17.041	1.691
	Pst_1min (L2)	11.685	2.283
2 luminarias encendidas	Pst (L1)	8.100	0.202
	Pst (L2)	5.721	0.384
	Pst_1min (L1)	17.029	0.533
	Pst_1min (L2)	11.739	1.013
3 luminarias encendidas	Pst (L1)	8.081	0.189
	Pst (L2)	5.708	0.359
	Pst_1min (L1)	17.015	0.458
	Pst_1min (L2)	11.712	1.021

Fuente: Autores

A partir de la tabla anterior se realiza la Figura 4.19, en la cual se observa los siguientes ítems:

- Los valores de P_{st} en luminarias LED se mantiene sus valores en los 3 casos de encendido.
- Los valores de P_{st} en luminarias sodio es mayor solo con una luminaria encendida a medida que se enciende más luminarias este valor disminuye.
- Se deduce que los valores de severidad de flicker en LED tienen un nivel muy alto, en cambio en sodio tiene valores que no pasan de la unidad (1).

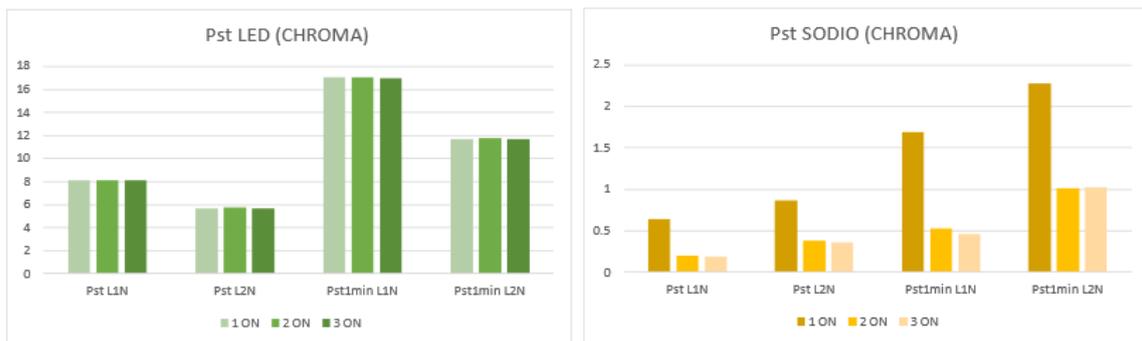


Figura 4.19: Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente variable Chroma en 3 casos de encendido.

Verificación del nivel de compatibilidad para parpadeo.

Según la Tabla 4.13 en luminaria tipo LED no cumple con el límite establecido de 0.9 ya que presenta valores muy elevados tanto de P_{st} y Pst_{1min} en las dos fases.

Mientras que en sodio solo cumple en severidad de corto plazo en duración de medición de 10 minutos (P_{st}), pero no así en ($P_{st_{1min}}$) que esta fuera del límite.

Comparación de flickers de luminaria sodio con LED en fuente variable Chroma.

En la Figura 4.20, muestra que en los tres casos de encendido, en ambas fases los valores de parpadeo para luminaria LED es mayor a la de sodio tanto en P_{st} y $P_{st_{1min}}$ por lo que en LED es más visible el parpadeo de luz.

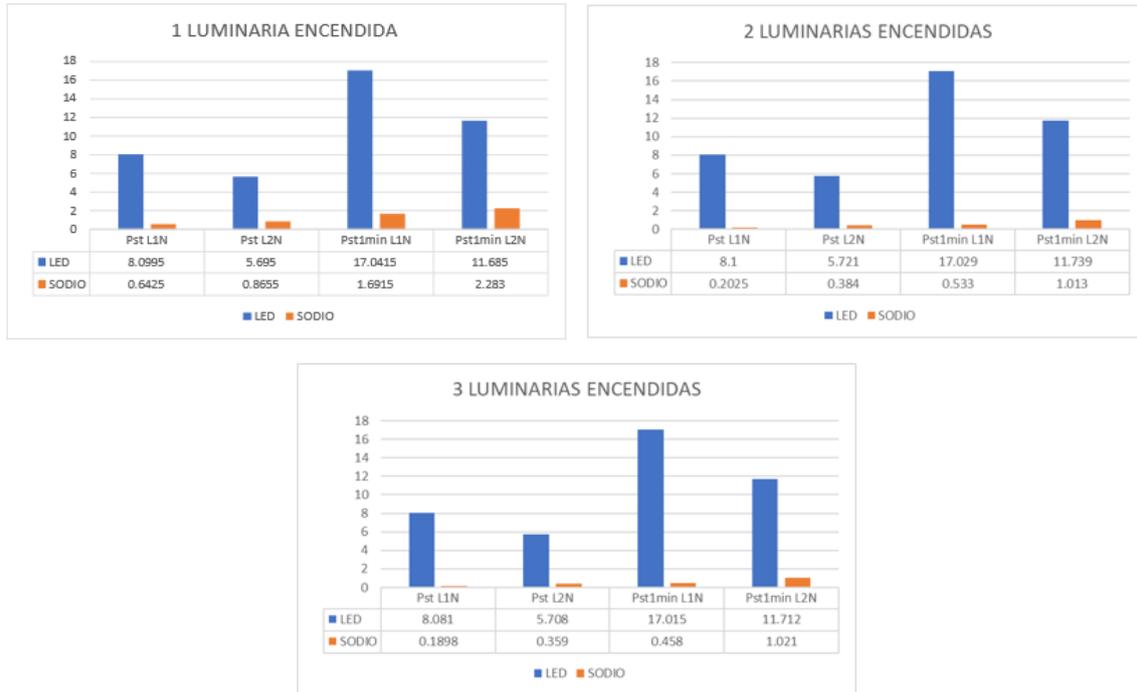


Figura 4.20: Diferencia severidad de flicker en luminaria sodio-LED con fuente variable Chroma.

Comparación de flickers entre fuente fija y fuente variable Chroma.

Al realizar una comparación de flickers entre las dos fuentes de alimentación se realizó una sumatoria de las dos fases del P_{st} y $P_{st_{1min}}$, en la cual se puede notar que para luminaria LED en fuente variable Chroma los datos son muy elevados por lo que en la práctica muestran un parpadeo muy perceptible al ojo humano, en cambio en fuente fija en muy pequeño el parpadeo por lo que es casi probable distinguir si se presentó el parpadeo en luminaria LED. Ver Tabla 4.14.

Mientras que las luminarias de sodio tanto para fuente fija y variable Chroma los datos de flicker no varían mucho en su valor.

Es decir, en fuente variable Chroma en los dos tipos de luminarias se visualiza más el parpadeo de luz, mientras que en fuente fija el parpadeo es muy minucioso al ojo humano por lo que los datos de flickers son muy bajos. Ver figura 4.25.

Tabla 4.14: Severidad de flicker de luminarias con fuente fija y variable.

LED						
	1 luminaria encendida		2 luminarias encendidas		3 luminarias encendidas	
	Fuente Fija	Fuente Variable	Fuente Fija	Fuente Variable	Fuente Fija	Fuente Variable
P_{st}	0.867	13.795	0.876	13.821	2.065	13.789
$P_{st_{1min}}$	1.079	28.727	0.876	28.768	3.707	28.727
SODIO						
	1 luminaria encendida		2 luminarias encendidas		3 luminarias encendidas	
	Fuente Fija	Fuente Variable	Fuente Fija	Fuente Variable	Fuente Fija	Fuente Variable
	Fija	Variable	Fija	Variable	Fija	Variable
P_{st}	0.998	1.508	0.977	0.587	1.156	0.549
$P_{st_{1min}}$	1.194	3.975	1.176	1.546	1.286	1.479

Fuente: Autores



Figura 4.21: Severidad de flicker entre fuente fija y fuente variable Chroma.

Análisis de curva de parpadeo Pst_{1min}

A partir de los diferentes datos obtenidos en la medición de flickers tanto para sodio y LED con fuente fija se ha realizado los gráficas de Pst_{1min} para realizar una comparación entre las dos tecnologías.

De las figuras 4.22, 4.23 y 4.24, se observa que a medida que se enciende una luminaria más los valores de severidad tienden a estabilizarse a un determinado valor. Tanto para luminaria de sodio y LED el rango de severidad del flickers oscila entre 0.6-0.7 en ambas fases.

Al comparar las curvas entre tecnologías se puede notar que la luminaria LED no presenta mucho disturbio de tensión en las dos líneas con pequeñas oscilaciones en ciertos minutos durante el intervalo de medición de los 10 minutos realizados.

En cambio, en las curvas de la luminaria de sodio presentan muchas oscilaciones, donde se observa que existen más valores de severidad del flicker en el intervalo de medición, pero manteniéndose en el rango que presenta la luminaria LED entre 0.6-0.7.

Dando así veracidad a los gráficos de barras presentados anteriormente el cual corroboran con los datos de medición tanto de P_{st} y Pst_{1min} medidos con la fuente fija.

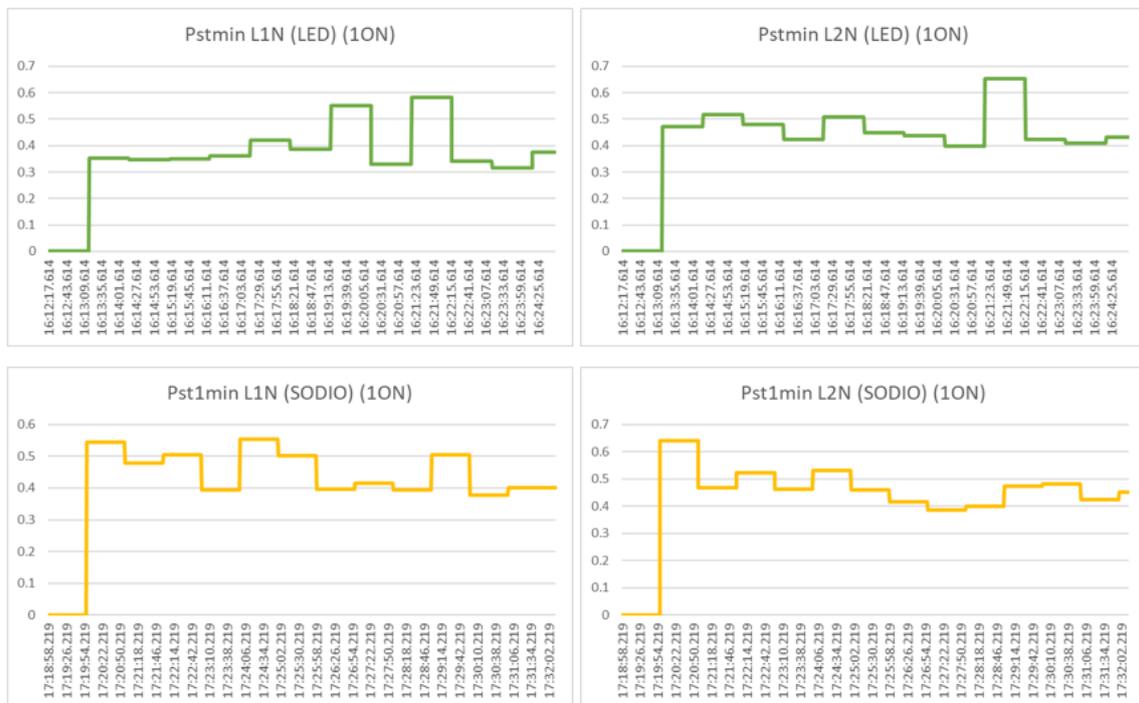


Figura 4.22: Curva de severidad de flicker (Pst_{1min}) de 1 luminaria encendida con fuente fija.

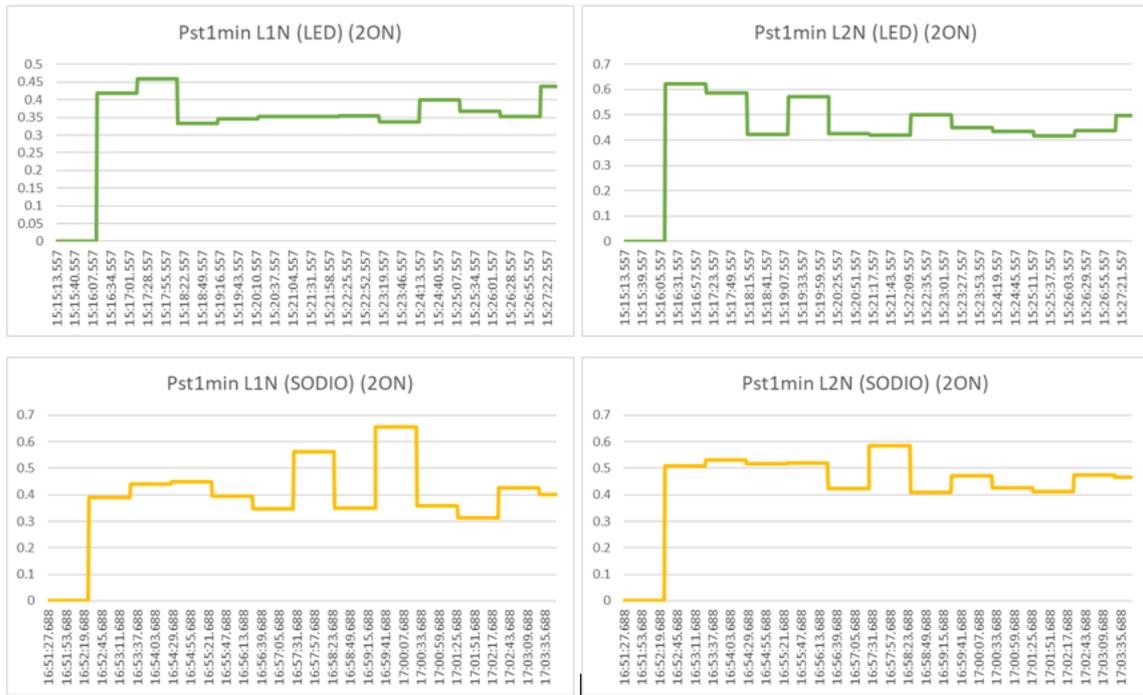


Figura 4.23: Curva de severidad de flicker (Pst_{1min}) de 2 luminarias encendidas con fuente fija.

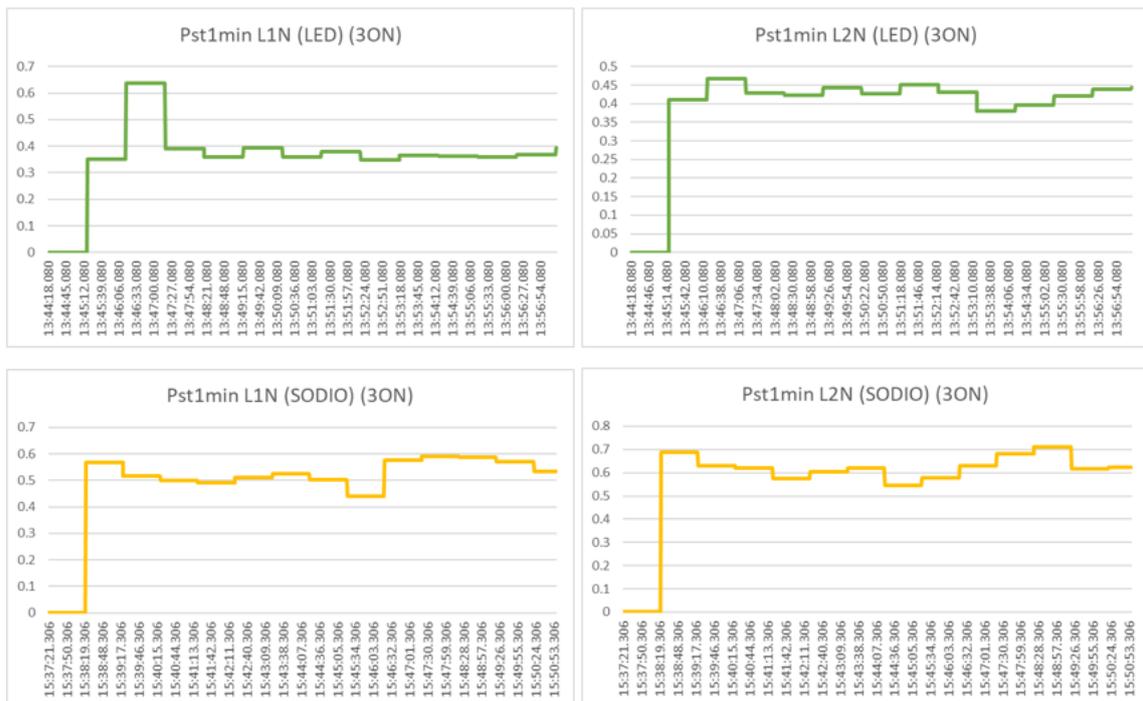


Figura 4.24: Curva de severidad de flicker (Pst_{1min}) de 3 luminarias encendidas con fuente fija.

En la Tabla 5.2 del Anexo 11, se muestran un ejemplo de los diferentes datos obtenidos al descargar del SoftPanel, que se utilizaron para realizar las diferentes gráficas presentadas anteriormente.

4.2.3 Análisis de Sags

La última perturbación por analizar son las depresiones de tensión o conocidos como Sags, que presenta cuando existe un cambio del flujo de corriente. En iluminación produce una disminución de la luminosidad al producirse arranque de cargas grandes.

En este estudio se ha utilizado la fuente variable Chroma para simular caídas de tensión y realizar una comparación de cambios de tensión y corriente entre los dos tipos de luminarias.

4.2.3.1 Simulación de caídas de tensión con fuente variable Chroma

Los distintos valores de las variables de simulación, así como los niveles de tensión y el tiempo de duración para simular esta perturbación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.15: Valores para la simulación de la depresión de tensión

Variable	Valor
Nom. Vac 1,2	120 V
Nom. F(Hz)	60 Hz
Sequence	0
Vac start (V)	70, 80, 90, 100 V
Vac_end (V)	70, 80, 90, 100 V
F_start (Hz)	60 Hz
F_end (Hz)	60 Hz
Count for all	1
Tiempo (cycle)	15, 30, 100, 250 ciclos

Fuente: Autores

Para la simulación se programó 4 depresiones de tensión en distintos periodos de tiempo, la forma de onda generada de la depresión de tensión se puede verificar en la figura 5.8 del Anexo 12.

Luego de realizar la simulación se obtiene cuatro eventos en cada caso de encendido en el cual mediante la Tabla 2.7, correspondiente a características de fenómenos electromagnéticos de la norma IEEE std 1159-2019 se clasifican a las depresiones de tensión por del tiempo de duración.

En los tres casos de encendido para luminaria tipo LED la duración del evento en por debajo de 1 minuto por lo que se clasifican como depresiones de tensión temporales, a diferencia que solo se presenta un evento con una duración mayor a 1 minuto al encender tres luminarias clasificándola como una depresión de subvoltaje. Ver Tabla 4.16.

Tabla 4.16: Clasificación de las depresiones de tensión de luminaria LED.

	Evento (#)	Nivel (V)	Duración (segundos)	Tipo (Según IEEE-1159-2019)
1 ON	Evento 1	69.9	55.037	Depresión de tensión temporal
	Evento 2	79.7	9.485	Depresión de tensión temporal
	Evento 3	89.1	29.434	Depresión de tensión temporal
	Evento 4	100	4.183	Depresión de tensión temporal
2 ON	Evento 1	69.2	55.037	Depresión de tensión temporal
	Evento 2	78.9	9.485	Depresión de tensión temporal
	Evento 3	89.1	29.434	Depresión de tensión temporal
	Evento 4	98.9	4.183	Depresión de tensión temporal
3 ON	Evento 1	69.4	36.514	Depresión de tensión temporal
	Evento 2	79	13.769	Depresión de tensión temporal
	Evento 3	89.1	52.489	Depresión de tensión temporal
	Evento 4	99.1	79.987	Depresión de subvoltaje

Fuente: Autores

En luminaria de sodio se observa que en los tres casos de encendido la duración del evento es por debajo de 1 minuto por lo que se clasifican como depresiones de tensión temporales. Además, los valores del nivel de tensión varían muy poco con el valor ingresado en la pantalla de *SoftPanel* por lo que no tiene mucha incidencia para realizar una comparación entre los dos tipos de luminarias. Ver Tabla 4.17.

Tabla 4.17: Clasificación de las depresiones de tensión de luminaria sodio.

	Evento (#)	Nivel (V)	Duración (segundos)	Tipo (Segun IEEE-1159-2019)
1 ON	Evento 1	69.9	20.407	Depresión de tensión temporal
	Evento 2	79.7	14.234	Depresión de tensión temporal
	Evento 3	89.1	6.357	Depresión de tensión temporal
	Evento 4	100	16.169	Depresión de tensión temporal
2 ON	Evento 1	69.2	23.585	Depresión de tensión temporal
	Evento 2	78.9	11.341	Depresión de tensión temporal
	Evento 3	89.1	34.733	Depresión de tensión temporal
	Evento 4	98.9	15.744	Depresión de tensión temporal
3 ON	Evento 1	69.4	26.693	Depresión de tensión temporal
	Evento 2	79	9.451	Depresión de tensión temporal
	Evento 3	89.1	56.912	Depresión de tensión temporal
	Evento 4	99.1	14.921	Depresión de tensión temporal

Fuente: Autores

Comparación de la depresión de tensión entre luminaria sodio y LED.

Al realizar los gráficos de barras con los datos de duración de la depresión de tensión entre luminaria sodio y LED se observa los siguientes ítems:

- Al encender una sola luminaria, se presenta dos eventos en la que los valores de

duración del sag de LED son mayores a la de sodio.

- En cambio al encender dos luminarias los valores de sodio son mayores a LED a excepción del evento (1).
- Cuando se enciende tres luminarias los valores de duración de la perturbación en LED son mayores a la de sodio en todos los eventos. Ver Figura

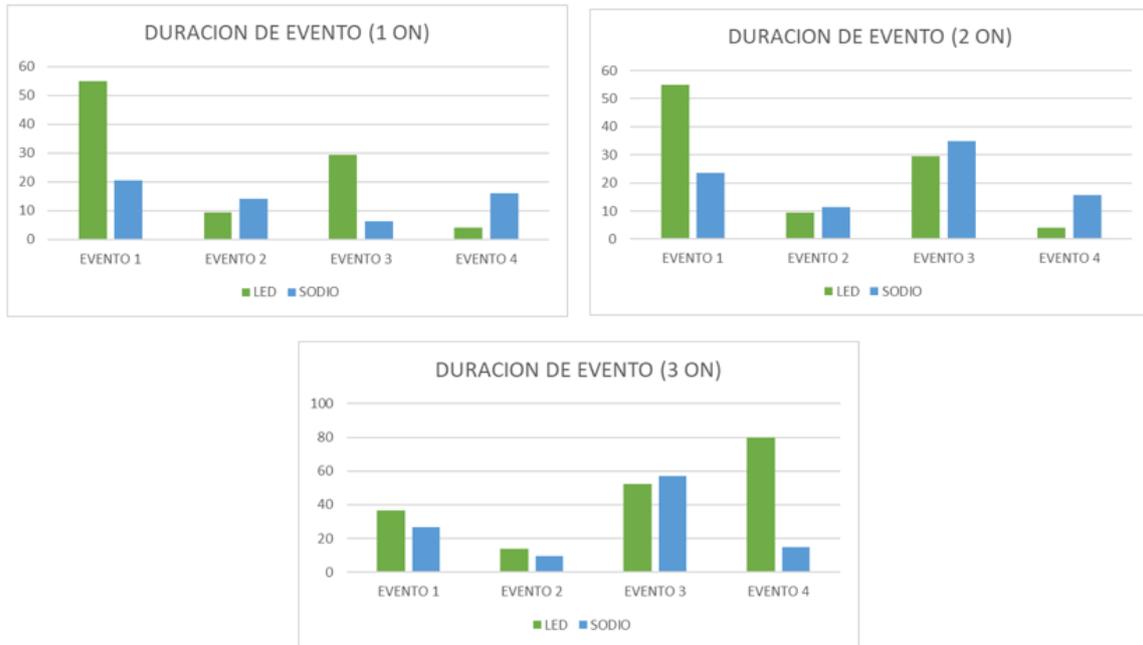


Figura 4.25: Comparación de duración de la depresión de tensión entre sodio y LED.

Comparación de niveles de tensión durante la perturbación (Sag).

En las figuras 5.9 y 5.10 del Anexo 13, presentan los diferentes diagramas obtenidos durante la medición los cuales sirven para comprobar las variaciones que ocurren en las tensiones de línea, y los eventos presentados por lo que por medio del Software *Power Log Classic* se observa de una manera más detallada.

En el que se observa que en la fase (B) es en donde se producen los valores más bajos de depresión de tensión tanto para LED y sodio, además los valores de tensión en cada evento no tiene mucha variación con el valor de tensión ingresado en la pantalla *List Mode* por lo que se mantiene en evento 1 (70V), en evento 2 (80V), en evento 3 (90V) y finalmente en el evento 4 con (100V).

4.3 Diseño de iluminación vial

La vía que esta junto a la planta de energía solar fotovoltaica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, es una vía de un solo carril con un ancho de 7 m. Esta vía cuenta con tres postes de hormigón de 14 m de altura situados a 2 m de la vía en el cual se ubicarán los dos tipos de luminarias para las mediciones respectivas.



Figura 4.26: Vía junto a planta solar fotovoltaica de la UPS.[Fuente: Autores.]

4.3.0.1 Cálculos y medición de parámetros lumínicos

4.3.0.1.1 Cálculo de interdistancia por medio del factor de utilización

Al realizar el cálculo del valor de interdistancia nos permite conocer el valor de nivel de montaje de las luminarias de acuerdo con el espacio entre postes que se encuentran en la vía, por lo que se debe conocer los valores de parámetros mencionados en el capítulo anterior los cuales son:

- Valor de iluminancia media (E_m)

La velocidad de tráfico por la vía es de baja velocidad por lo que según la Tabla 3.4 corresponde a una clasificación de tipo (D), ya que contienen una acera para transeúnte paralelo a la calzada corresponde a una clase de alumbrado tipo (CE2).

El valor de iluminancia media para esta clase de alumbrado (CE2) según la Tabla 3.6 nos indica que debe de ser un valor alrededor de 20 (lux).

- Valor de altura de montaje

Debido que la vía es de un tramo recto con implantación unilateral según la Tabla corresponde a un tipo de iluminación (M4) con una altura de instalación entre 7-9 m.

Por lo que se ha elegido una altura de instalación de 8.5 m, en cual se verifica que si cumple la relación S/H que debe estar en el rango de 3.5-4.

- Valor del factor de mantenimiento (f_m)

El valor promedio del (f_m) es de 0.7, debido a que esta vía en la que se realizó la medición es de poco tráfico y índice de contaminación baja.

- Valor de factor de utilización (η)

Con el dato de A (ancho de vía) y H (altura de montaje), se calcula A2/H y A1/H.

$$\frac{A_1}{H} = \frac{6.85 \text{ mts}}{8.5 \text{ mts}} = 0.805 \quad (4.1)$$

$$\frac{A_2}{H} = \frac{0.15 \text{ mts}}{8.5 \text{ mts}} = 0.017 \quad (4.2)$$

Según los valores calculados de A1/H y A2/H y la Figura 3.9 relacionada a la curva de la función cociente se obtiene los valores de η_1 y η_2 y obteniendo así un η total que será el valor de factor de utilización.

$$\eta_1 = 0.29$$

$$\eta_2 = 0.13$$

$$\eta = 0.42$$

La Tabla 4.18, muestra los datos antes calculados que servirán para verificar el valor de la interdistancia entre postes en donde se instalarán las luminarias para su medición de parámetros lumínicos.

Tabla 4.18: Valores para cálculo de interdistancia.

Parámetro	Valor
Illuminancia media (E_m)	20 lx
Ancho de calzada (A)	7 m
Factor de mantenimiento (f_m)	0.7
Factor de utilización (η)	0.42
Flujo luminoso luminaria de sodio (Φ_L)	1400 lm

Fuente: Autores

Sustituyendo :

$$d = \frac{\eta * f_m * \Phi_L}{A * E_m}$$

$$d = \frac{(0.42) * (0.7) * (14000)}{(7) * (20)}$$

$$d = 29(m)$$

Este valor calculado de 29 m da veracidad a la distancia en la que se encuentran instalados los postes de hormigón ya que su distancia promedio realiza en la medición fue de 29.5 m. Así también la altura seleccionada de 8.5 m es la indicada para la instalación de los dos tipos de luminarias, debido a que cumple la relación S/H=3.50 para una clase de iluminación M4 con disposición de luminarias tipo unilateral especificado en la Tabla 3.7.



Figura 4.27: Montaje de luminarias tipo sodio.[Fuente: Autores.]



Figura 4.28: Montaje de luminarias tipo LED.[Fuente: Autores.]

4.3.0.1.2 Medición de parámetros lumínicos por el método de los nueve puntos.

Las tablas 5.15 y 5.16 del Anexo 14, muestran los datos de medición, midiendo en dos casos: encendidas y apagadas las luminarias. Por lo tanto, se realizó una resta de estos dos valores y así obtener el dato de la intensidad de iluminación que da cada tipo de luminaria. Ver Tabla 4.19.

Tabla 4.19: Valores medidos de iluminancia y luminancia por el método de los 9 puntos.

LUXÓMETRO						LUMINANCÍMETRO					
SODIO			LED			SODIO			LED		
E1	22.34	lx	E1	36.04	lx	E1	0.5	cd/m^2	E1	0.97	cd/m^2
E2	25.95	lx	E2	35.15	lx	E2	0.35	cd/m^2	E2	0.75	cd/m^2
E3	15.28	lx	E3	25.66	lx	E3	0.35	cd/m^2	E3	0.75	cd/m^2
E4	10.38	lx	E4	20.91	lx	E4	0.61	cd/m^2	E4	0.81	cd/m^2
E5	14.15	lx	E5	28.56	lx	E5	0.66	cd/m^2	E5	1.07	cd/m^2
E6	9.88	lx	E6	25.05	lx	E6	0.52	cd/m^2	E6	0.89	cd/m^2
E7	5.65	lx	E7	11.55	lx	E7	0.48	cd/m^2	E7	0.76	cd/m^2
E8	7.99	lx	E8	16.22	lx	E8	0.63	cd/m^2	E8	0.96	cd/m^2
E9	6.4	lx	E9	17.75	lx	E9	0.47	cd/m^2	E9	0.76	cd/m^2

Fuente: Autores

Con los datos de la tabla anterior y sustituyendo en las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8 se obtienen los valores de valor medio (E_m), uniformidad global (U_o) y extrema longitudinal (U_L), para verificar si cumple con los límites de luminancia e iluminancia según la Regulación ARCERNNR 006/20.

Para ello se ha realizado las siguientes hojas técnicas para cada tipo de luminaria.

MEDICIÓN DE PARAMETROS LUMÍNICOS

DIRECCION: UPS Sede Cuenca

FECHA: dic-22

OBSERVACIONES: Noche sin lluvia, sin influencia de luces alrededor.

LUMINARIA	TIPO	POTENCIA [W]	lm
	SODIO	150	14000
ESTADO	USADA		

METODO EUROPEO DE LOS 9 PUNTOS

$$E_m = \frac{E_1 + 2E_2 + E_3 + 2E_4 + 4E_5 + 2E_6 + E_7 + 2E_8 + E_9}{16}$$

$$U_o = \frac{E_{m\text{mínima}}}{E_m} \quad U_L = \frac{E_m}{E_{m\text{máxima}}}$$

ARCERNR 006/20

Clases de iluminación	Todas las vías			Vías sin o con pocas intersecciones	Vías con acceso no iluminado para clases P1 a P4
	Luminancia promedio Lprom (cd/m²) Mínimo recomendado	Factor de uniformidad Uo Mínimo	TI% Máximo	Factor de uniformidad longitudinal de iluminación UL Mínimo	Relación de acceso SR mínimo
M1	2	0.4	10	0.7	0.5
M2	1.5	0.4	10	0.7	0.5
M3	1.0	0.4	10	0.7	0.5
M4	0.8	0.4	10	NR	NR
M5	0.6	0.4	10	NR	NR

DATOS MEDIDOS

cd/m²	
E1	0.5
E2	0.35
E3	0.35
E4	0.61
E5	0.66
E6	0.52
E7	0.48
E8	0.63
E9	0.47
min	0.35
max	0.66

LUXES	
E1	22.34
E2	25.95
E3	15.28
E4	10.38
E5	14.15
E6	9.88
E7	5.65
E8	7.99
E9	6.4
min	5.65
max	25.95

Flujo Medio (Em) = **0.54125** cd/m²

Uniformidad global (Uo) = **0.64665127**

Uniformidad longitudinal (UL) = **0.820075758**

Flujo Medio (Em) = **13.416875** lx

Uniformidad global (Uo) = **0.421111473**

Uniformidad longitudinal (UL) = **0.517027938**

Tipo iluminación	Lprom	Uo	TI%	UL	SR
M4	0.8	0.4	10	NR	NR

NO CUMPLE

Clase iluminación	V.promedio lx	V.minimo lx
P1	20	7.5

NO CUMPLE

Figura 4.29: Mediciones fotométricas por método de los 9 puntos en la vía junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (150W- Na). [Autores]

En conclusión de las mediciones efectuadas en esta vía, podemos definir que el resultado obtenido de 0.54 cd/m^2 , la iluminancia de 13.41 Lux, los parámetros lumínicos, **No cumple** con las condiciones de iluminación de una vía catalogada como M4 según los límites establecidos por la regulación ARCERNR 006/20.

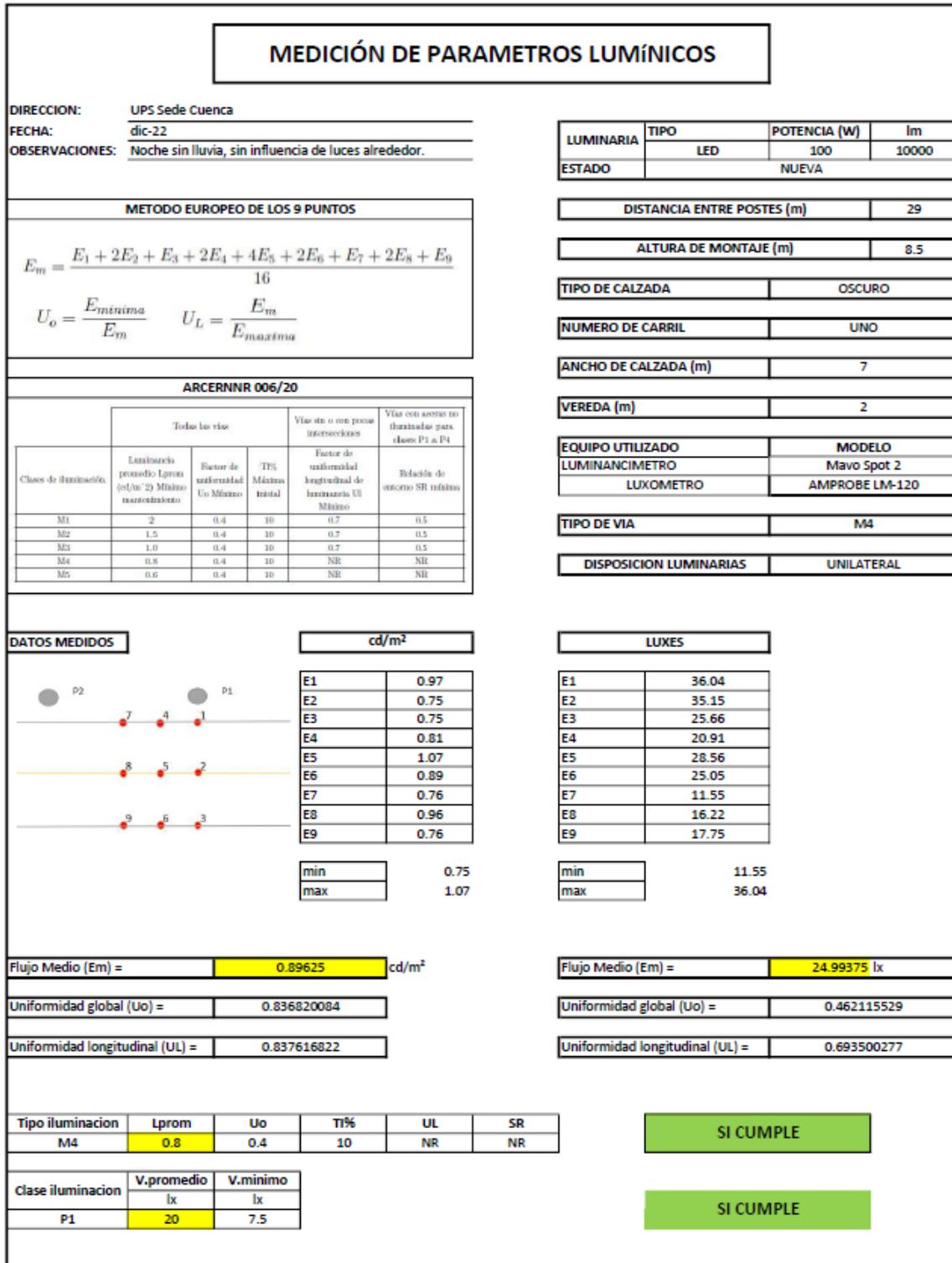


Figura 4.30: Mediciones fotom\u00e9tricas por m\u00e9todo de los 9 puntos en la v\u00eda junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (100- LED). [Autores]

De la Figura 4.30, podemos definir que el resultado obtenido de 0.90 cd/m^2 , la iluminancia de 25 Lux, los par\u00e1metros lum\u00ednicos, **Si cumple** con las condiciones de iluminaci\u00f3n de una v\u00eda catalogada como M4 seg\u00fan los l\u00edmites establecidos por la regulaci\u00f3n ARCERNR 006/20.

Medición de parámetros lumínicos por el método de la malla completa.

Las tablas 5.17 y 5.18 del Anexo 14, muestran los datos de la medición de la malla a lo largo de los tres postes, midiendo en dos casos: encendidas y apagadas las luminarias. Al igual que el método anterior se realizó una resta de estos dos valores y así tener un dato más cercano de la intensidad de iluminación que da cada tipo de luminaria. Ver Tabla 4.20.

Tabla 4.20: Valores medidos de iluminancia y luminancia en malla total.

LUXOMETRO								LUMINANCIMETRO							
SODIO				LED				SODIO				LED			
P1	17.47	P31	23.48	P1	34.42	P31	34.38	P1	0.5	P31	0.53	P1	0.84	P31	0.76
P2	18.82	P32	28.4	P2	33.02	P32	32.4	P2	0.55	P32	0.5	P2	0.85	P32	0.83
P3	15.43	P33	18.85	P3	29.8	P33	28.85	P3	0.5	P33	0.43	P3	0.71	P33	0.76
P4	14.61	P34	19.07	P4	27.09	P34	30.27	P4	0.53	P34	0.45	P4	0.75	P34	0.74
P5	15.61	P35	23.34	P5	28	P35	24.84	P5	0.57	P35	0.31	P5	0.86	P35	0.68
P6	13.09	P36	16.17	P6	25.35	P36	27.02	P6	0.45	P36	0.25	P6	0.74	P36	0.66
P7	9.88	P37	13.55	P7	19.89	P37	21.7	P7	0.62	P37	0.36	P7	0.84	P37	0.6
P8	8.97	P38	12.8	P8	21.1	P38	23.85	P8	0.63	P38	0.26	P8	0.87	P38	0.6
P9	9.58	P39	11.12	P9	21.65	P39	21.42	P9	0.47	P39	0.23	P9	0.7	P39	0.5
P10	7.67	P40	8.54	P10	15.8	P40	16	P10	0.56	P40	0.24	P10	0.97	P40	0.54
P11	8.73	P41	10.04	P11	18.18	P41	18.84	P11	0.54	P41	0.29	P11	1.01	P41	0.44
P12	7.77	P42	7.81	P12	18.82	P42	18.34	P12	0.43	P42	0.27	P12	0.73	P42	0.55
P13	6.81	P43	7.48	P13	13.24	P43	11.94	P13	0.51	P43	0.23	P13	0.76	P43	0.43
P14	4.91	P44	8.64	P14	16.06	P44	14.89	P14	0.61	P44	0.3	P14	0.88	P44	0.51
P15	7.91	P45	8.24	P15	17.45	P45	14.72	P15	0.49	P45	0.28	P15	0.89	P45	0.57
P16	6.53	P46	7.89	P16	13.35	P46	11.31	P16	0.51	P46	0.24	P16	0.85	P46	0.58
P17	8.45	P47	10.2	P17	15.71	P47	14.07	P17	0.65	P47	0.3	P17	0.89	P47	0.59
P18	8.1	P48	10.06	P18	18.07	P48	15.97	P18	0.5	P48	0.34	P18	0.9	P48	0.53
P19	7.8	P49	8.75	P19	16.33	P49	12.73	P19	0.59	P49	0.3	P19	0.87	P49	0.47
P20	8.75	P50	12.26	P20	18.42	P50	17.03	P20	0.41	P50	0.36	P20	0.9	P50	0.64
P21	8.9	P51	10.91	P21	22.15	P51	18.78	P21	0.42	P51	0.35	P21	0.87	P51	0.64
P22	11.45	P52	10.89	P22	23.93	P52	18.38	P22	0.63	P52	0.36	P22	0.9	P52	0.66
P23	12.62	P53	12.68	P23	27.07	P53	20.55	P23	0.57	P53	0.45	P23	0.93	P53	0.87
P24	11	P54	11.52	P24	27.05	P54	22.3	P24	0.4	P54	0.4	P24	0.89	P54	0.91
P25	18.2	P55	13.52	P25	31.37	P55	25.45	P25	0.52	P55	0.33	P25	0.84	P55	0.75
P26	18.88	P56	15.56	P26	32.98	P56	26.46	P26	0.6	P56	0.48	P26	0.89	P56	0.91
P27	16.39	P57	13.16	P27	29.71	P57	27.77	P27	0.48	P57	0.32	P27	0.87	P57	0.9
P28	23.94	P58	20.17	P28	36.14	P58	33.47	P28	0.55	P58	0.56	P28	0.84	P58	0.87
P29	26.19	P59	21.54	P29	34.69	P59	31.84	P29	0.59	P59	0.41	P29	0.89	P59	0.96
P30	19.02	P60	16.02	P30	30.62	P60	29.15	P30	0.47	P60	0.4	P30	0.8	P60	0.83

Fuente: Autores

Con los datos de la tabla anterior y sustituyendo en las ecuaciones 3.9 y 3.10 se calcula los valores promedios de luminancia e iluminancia, para verificar si cumple con los límites según la Regulación ARCERNR 006/20.

Así también se ha realizado las siguientes hojas técnicas para cada tipo de luminaria con los 60 datos medidos que es el número de puntos que engloba la malla a lo largo de los 3 postes.

En las figuras 4.31 y 4.6 se observa que al igual que en el método de los 9 puntos que sodio no cumple con los límites indicados en la regulación, pero la luminaria tipo LED si cumple.

MEDICIÓN DE PARAMETROS LUMÍNICOS

DIRECCION: UPS Sede Cuenca
FECHA: dic-22
OBSERVACIONES: Noche sin lluvia, sin influencia de luces alrededor.

LUMINARIA	TIPO	POTENCIA (W)	Im
	SODIO	150	14000
ESTADO		USADA	

METODO EUROPEO DE LOS 9 PUNTOS							
$E_m = \frac{E_1 + 2E_2 + E_3 + 2E_4 + 4E_5 + 2E_6 + E_7 + 2E_8 + E_9}{16}$ $U_o = \frac{E_{minima}}{E_m} \quad U_L = \frac{E_m}{E_{maxima}}$							
ARCERNR 006/20							
Clases de Iluminación	Todas las vías			Vías sin o con pocas intersecciones		Vías con acceso no iluminadas para clases P1 a P4	
	Luminancia promedio (cd/m ²) Mínimo recomendado	Factor de uniformidad Uo Mínimo	TI% Máximo	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia UL Mínimo	Relación de entorno SR máxima		
M1	2	0.4	10	0.7	0.5		
M2	1.5	0.4	10	0.7	0.5		
M3	1.0	0.4	10	0.7	0.5		
M4	0.8	0.4	10	NR	NR		
M5	0.6	0.4	10	NR	NR		

DISTANCIA ENTRE POSTES (m)		29
ALTURA DE MONTAJE (m)		8.5
TIPO DE CALZADA		OSCURO
NUMERO DE CARRIL		UNO
ANCHO DE CALZADA (m)		7
VEREDA (m)		2
EQUIPO UTILIZADO		MODELO
LUMINANCIMETRO		Mavo Spot 2
LUXOMETRO		AMPROBE LM-120
TIPO DE VIA		M4
DISPOSICION LUMINARIAS		UNILATERAL

DATOS MEDIDOS

cd/m ²		LUXES	
∑ luminancia	26.38	∑ luminancia	786.14
# puntos	60	# puntos	60
min	0.23	min	4.91
max	0.65	max	28.4
Flujo Medio (Em) =	0.43966667 cd/m ²	Flujo Medio (Em) =	13.10233333 lx
Uniformidad global (Uo) =	0.523123578	Uniformidad global (Uo) =	0.374742412
Uniformidad longitudinal (UL) =	0.676410256	Uniformidad longitudinal (UL) =	0.461349765

Tipo iluminación	Lprom	Uo	TI%	UL	SR
M4	0.8	0.4	10	NR	NR

NO CUMPLE

Clase iluminación	V.promedio lx	V.minimo lx
P1	20	7.5

NO CUMPLE

Figura 4.31: Mediciones fotométricas por el método de malla total en la vía junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (150W- Na). [Autores]

MEDICIÓN DE PARAMETROS LUMÍNICOS

DIRECCION: UPS Sede Cuenca
FECHA: dic-22
OBSERVACIONES: Noche sin lluvia, sin influencia de luces alrededor.

METODO EUROPEO DE LOS 9 PUNTOS

$$E_m = \frac{E_1 + 2E_2 + E_3 + 2E_4 + 4E_5 + 2E_6 + E_7 + 2E_8 + E_9}{16}$$

$$U_o = \frac{E_{\text{minima}}}{E_m} \quad U_L = \frac{E_m}{E_{\text{maxima}}}$$

LUMINARIA	TIPO	POTENCIA (W)	lm
	LED	100	10000
ESTADO	NUEVA		
DISTANCIA ENTRE POSTES (m)		29	
ALTURA DE MONTAJE (m)		8.5	
TIPO DE CALZADA		OSCURO	
NUMERO DE CARRIL		UNO	
ANCHO DE CALZADA (m)		7	
VEREDA (m)		2	
EQUIPO UTILIZADO		MODELO	
LUMINANCIMETRO		Mavo Spot 2	
LUXOMETRO		AMPROBE LM-120	
TIPO DE VIA		M4	
DISPOSICION LUMINARIAS		UNILATERAL	

ARCERNR 006/20

Clases de iluminación.	Toda la vía			Visa sin o con pocas intersecciones	Visa con acceso no iluminado para clases P1 a P4
	Luminancia promedio Lprom (cd/m ²) Mínimo recomendado	Factor de uniformidad Uo Mínimo	TI% Máximo inicial	Factor de uniformidad longitudinal de luminancia UL Mínimo	Relación de entorno SR máxima
M1	2	0.4	10	0.7	0.5
M2	1.5	0.4	10	0.7	0.5
M3	1.0	0.4	10	0.7	0.5
M4	0.8	0.4	10	NR	NR
M5	0.6	0.4	10	NR	NR

DATOS MEDIDOS

cd/m ²	
∑ luminancia	48.08
# puntos	60
min	0.43
max	1.01
Flujo Medio (Em) =	0.801333333 cd/m ²
Uniformidad global (Uo) =	0.536605657
Uniformidad longitudinal (UL) =	0.79339934

LUXES	
∑ luminancia	1382.18
# puntos	60
min	11.31
max	36.14
Flujo Medio (Em) =	23.03633333 lx
Uniformidad global (Uo) =	0.49096355
Uniformidad longitudinal (UL) =	0.637419295

Tipo iluminación	Lprom	Uo	TI%	UL	SR
M4	0.8	0.4	10	NR	NR

SI CUMPLE

SI CUMPLE

Figura 4.32: Mediciones fotométricas por el metodo de malla total en la vía junto a la planta solar fotovoltaica de la UPS (100- LED). [Autores]

Para finalizar este procedimiento, se realiza la simulación en *DIALux evo* para verificar si los valores medidos se asemejan a los valores calculados y realizar una comparación entre ellos.

4.3.0.2 Simulaciones de parámetros lumínicos

De acuerdo a la Tabla 2.10 se considera que el tipo de iluminación para la vía que esta junto a la planta de energía solar fotovoltaica es tipo **M4**. Los parámetros fotométricos para este tipo de vía según la regulación ARCERNNR 006/20 y que servirán para simular en software *DIALux evo* son:

Tabla 4.21: Parámetros de la vía para la simulación

Tipo de vía	Condiciones de la vía	Parámetros a evaluar
M4	La vía tiene un ancho de 7m y consta de un solo carril y una acera de 2m. El pavimento es de clase R4 de mucho uso y sin mantenimiento.	$L_m \geq 0.8 \text{ cd/m}^2$ $U_o \geq 40 \%$ $U_l \geq 70 \%$ $TI \leq 10$ $SR \geq 0.5$

Fuente: Autores

La distancia entre postes bordea los 29 m, valor que sera usado para la simulación, mientras que los brazos que soportan las luminarias son de 2 m. La Tabla 4.22 resume los parámetros de la disposición de las luminarias tanto para sodio y LED ingresados en el software *DIALux evo*.

Tabla 4.22: Parámetros de la disposición de las luminarias

Altura del punto de luz	8.5 m
Longitud del brazo	2 m
Distancia entre mástiles	29 m
Tipo de disposición	Unilateral
Luminarias por mástil	1

Fuente: Autores

La Figura 4.33, se observa las medidas de la vía simulada.

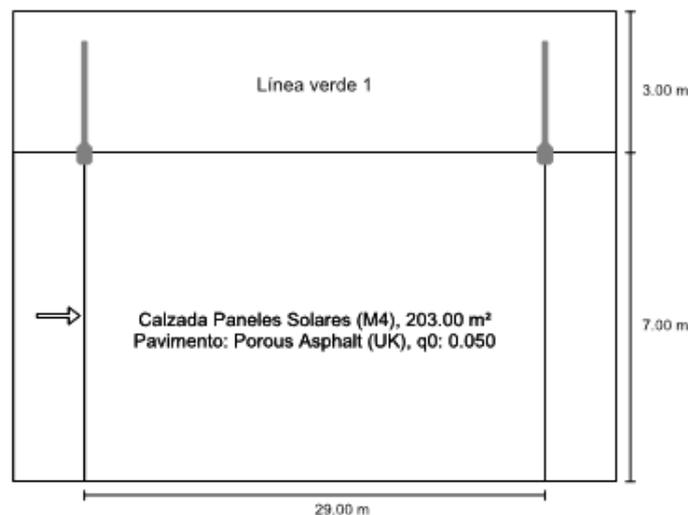


Figura 4.33: Simulación de iluminación vial [Elaboración propia, obtenido de *DIALux evo*.]

Conforme a los datos de la Tabla 2.14 la clase de iluminación para tráfico peatonal con gran afluencia de circulación de estudiantes y docentes en horario diurno y nocturno por lo que para este estudio se estima de clase **P1**, con las siguientes características.

Tabla 4.23: Características de la acera con tráfico peatonal

Clase	Descripción del uso	Iluminación (lx)
P1	Vía de gran importancia.	$E \geq 7.5$ lx

Fuente: Autores

Una vez ingresado la característica de la vía y disposición de luminarias se importan luminarias de catálogos de fabricantes con características semejantes a las usadas en las mediciones, obteniendo:

Tabla 4.24: Resultados de evaluación en *DIALux evo*

		REGULACION ARCERNNR 006/20	SAP 150 W	LED 100 W
Calzada (M4)	Lm (cd/m^2)	≥ 0.8	0.58	0.84 ✓
	U_o	≥ 0.4	0.82 ✓	0.63 ✓
	U_I	No requerido	0.67	0.87
	TI (%)	10	12	10 ✓
	SR	No Requerido	0.53	0.54
Clase (P1)	Emin (lx)	7.5	5.35	7 ✓

Fuente: Autores

Se observa que la luminaria tipo LED cumple con la mayoría de las condiciones, mientras en sodio está por debajo de los límites indicados. Al realizar una comparación de resultados calculados y simulados se puede comparar que método da valores más cercanos a los indicados en la regulación vigente según el tipo de vía en el que se realizó este estudio.

Tabla 4.25: Resultados de evaluación en *DIALux evo*

SODIO				
	Regulación ARCERNNR 006/20	Método de 9 puntos	Método de malla Completa	Simulación en Dialux
Flujo medio (lx)	7.5 - 20	13.41	13.102	13
Lm (cd/m^2)	≥ 0.8	0.541	0.439	0.58
U_o	≥ 0.4	0.646	0.523	0.82
U_I	≥ 0.7	0.820	0.676	0.67
LED				
	Regulación ARCERNNR 006/20	Método de 9 puntos	Método de malla Completa	Simulación en Dialux
Flujo medio (lx)	7.5 - 20	25	23	20.8
Lm (cd/m^2)	≥ 0.8	0.90	0.80	0.84
U_o	≥ 0.4	0.836	0.536	0.63
U_I	≥ 0.7	0.837	0.80	0.87

Fuente: Autores

De la tabla anterior se observa que la luminaria tipo LED presenta el mejor flujo medio ya que tiene valores que sobrepasan el promedio de luxes que es de 20 (lx).

La luminaria tipo sodio no cumple con el valor de luminancia promedio esto se verifica en los 3 métodos realizados.

Los valores de uniformidad global U_o están dentro del límite indicado, esto para los dos tipos de luminarias.

En si los valores lumínicos que presenta la luminaria tipo LED son mejores a comparación de la luminaria de sodio sobre todo el nivel de iluminancia que en la práctica de campo se observó que la luz emitida es más perceptible al ojo humano dando mejor iluminación a la calzada.

Los 3 métodos realizados presentan valores similares entre unos y otros por lo que el usuario puede usar cualquier método para la medición de parámetros lumínicos y corroborando los resultados con el uso de *DIALux evo*.

La hoja técnica de las luminarias usadas para la simulación en *DIALux evo* se presentan en el Anexo 12, en el cual se puede observar:

- Resumen de resultados de los dos tipos de luminarias
- Tablas de intensidad lumínica
- Imagen de isolíneas.
- Gráfico de valores de intensidad lumínica

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Esta investigación se enfoca en el análisis de perturbaciones eléctricas que se pueden presentar en la red de distribución, provocadas por luminarias de tecnología LED, sin embargo, también se analiza en las luminarias de sodio puesto que la medición se realiza con los dos tipos luminarias y así poder comparar resultados. Para lo cual, se usó como referencia la regulación nacional ARCERNNR, las normativas internacionales IEC y IEEE, los cuales tienen como objetivo brindar energía eléctrica de calidad para garantizar un correcto funcionamiento de equipos e instalaciones a la red. Para ello la regulación vigente con respecto al tema de calidad de energía emitido por ARCERNNR ha sido tomado como base para el estudio de esta investigación, ya que en ella se indica los índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica.

Para las medición y simulación, los dos tipos de luminarias fueron elegidas en base al cálculo de flujo luminoso equivalente para así poder verificar si la luminaria LED puede sustituir a la de sodio, dando un resultado favorable por lo que la luminaria de sodio de 150W de la Marca 1, puede ser sustituida por la luminaria de tecnología LED de 100W de la Marca 2.

Las perturbaciones eléctricas producidas por los dos tipos de luminarias que se estudiaron en esta investigación son Armónicos, Flickers y Sag. Las mediciones fueron realizadas por el equipo de medidor de calidad de energía Fluke 435-II, la simulación de perturbaciones con la ayuda de la fuente programable Chroma, mientras que la medición de los parámetros lumínicos con un luminancímetro Mavo Spot 2 y un luxómetro Amprobe LM-120.

Al momento de realizar las mediciones de las perturbaciones como primera perspectiva se observó que al encender las luminarias de sodio necesitan un pequeño lapso para que la bombilla interna se encienda completamente y así tenga su nivel de flujo luminoso completo esto debido a que se necesita un tiempo luego de haberse producido la descarga eléctrica para que el gas de la bombilla se caliente y se ionice lo suficiente para producir luz.

Además, las luminarias de sodio muestran un color amarillo muy cálido, sin embargo, al encender las luminarias de tecnología LED el encendido es inmediato y el flujo luminoso hacia donde están proyectados es mucho mejor que la luminaria de sodio debido a la temperatura de color que tiene cada una de ellas.

Con los datos de armónicos medidos en la fuente fija, se determina que el tercer armónico (H3) es el más influyente en la distorsión de onda sinusoidal de la red eléctrica, tanto para luminaria de sodio como las de LED. Al realizar una comparación del histograma presentado por el Software SoftPanel la luminaria de sodio presenta porcentajes en todos los órdenes de armónicos sobre todo en THDi en ambas líneas de alimentación. En cambio, para LED solo el de tercer orden es el que presenta mayor porcentaje de distorsión, los otros de diferente orden muestran valores despreciables.

La variación de valores se debe a que la luminaria LED tiene un dispositivo electrónico llamado driver, el cual sirve para mantener los niveles de distorsión armónica dentro de los parámetros establecidos, ya que este controlador aparte de transformar la energía alterna en continua y estabilizar la corriente, también regula la corriente que circula por la placa de LEDs, además sirve como elemento de protección de sobretensiones o sobrecorrientes para asegurar un brillo uniforme y constante, maximizando la vida útil del LED. Esta variación de valores entre los dos tipos de luminarias se observa en los gráficos de barras presentados.

Según los límites de porcentaje armónico de la Regulación ARCERNR-002/20 para luminaria de sodio cumple con los límites en todo los órdenes de armónicos a excepción del valor de THDv, este valor también sucede con la luminaria LED donde además el valor del tercer armónico (H3) en la fase B excede el límite permitido de 30%, esto debido a la alimentación bifásica que tiene corrientes desfasadas entre sí, lo que puede provocar armónicos adicionales en una de las fases a las que alimentan las luminarias.

Se observó que a medida que se enciende una luminaria adicional en el circuito ya sea sodio o LED existe un pequeño aumento de los valores armónicos tanto en THD de voltaje y corriente como de los diferentes ordenes armónicos. Respecto a los THDi para luminaria de sodio los valores son mayores a la LED en los tres casos de encendido esto debido a que las luminarias de sodio usan un arco eléctrico en la bombilla al momento de encenderlas generando así armónicos en la forma de onda de corriente lo que respecto a LED por su diseño electrónico generan menos porcentaje armónico.

Al realizar la simulación de armónicos en la fuente programable Chroma se observó que en los dos tipos de luminarias los diferentes ordenes de armónicos están dentro del límite establecido de la norma a excepción de los valores de THDv, en ambos casos esta fuera del límite. En la fuente fija a medida que se enciende una luminaria más en el circuito estos valores de armónicos elevan en pequeña medida su valor. Las diferentes curvas de oscilación originadas en esta simulación presentan mayor distorsión en luminaria LED debido a que se alimenta con energía pura, pero por

los dispositivos electrónicos y los diodos emisores de luz se presenta una distorsión más significativa comparando con la forma de onda de la luminaria de sodio que se asemeja a la onda senoidal sin presentar mucha perturbación.

Con lo que respecta a Flickers los valores tanto de Pst y Pst(1min) para luminaria LED presentan valores elevados a la luminaria de sodio, en este tipo de luminaria de sodio estos valores se mantienen a medida que se incrementa una luminaria más en el circuito, dando cumplimiento al límite indicado en la normativa correspondiente que es de 0.9 el índice de severidad. En cambio, para LED los valores se mantienen hasta encender una segunda luminaria ya que al encender una tercera luminaria los parámetros de severidad aumentan considerablemente esto debido al circuito de funcionamiento interno que para producir la luz es a través de fotones por parte de semiconductores produciendo un parpadeo más perceptible al ojo humano.

Al realizar la simulación de Flickers en luminaria sodio y LED, se observó que la de tecnología LED presento un parpadeo rápido y muy visible en el lugar de la medición, en cambio para sodio fue un parpadeo un poco más lento, esto a pesar de que en la fuente variable Chroma se programó los mismos parámetros de simulación para ambos casos. Los valores de severidad no tienen mucha variación a medida que se enciende una luminaria más, pero si hay diferencia al comparar entre las dos tecnologías donde por la acción de luz emitida en el parpadeo descrita anteriormente en luminaria LED presenta valores más elevados.

Las depresiones de tensión o conocido como Sags se realizó una simulación con cuatro depresiones de tensión (70, 80, 90, 100 V) en la cual según la duración del evento se clasificó el tipo de depresión para los dos tipos de luminarias según la normativa correspondiente fueron depresiones de tensión temporal en los tres casos de encendido a excepción en LED que al encender tres luminarias en el circuito la duración del evento fue mayor a 1 minuto clasificándolo así como una depresión de subvoltaje.

Al comparar los datos de duración de eventos la que presenta mayor duración es en luminaria LED esto puede ocurrir por la incompatibilidad entre el driver LED y la red de alimentación, al hablar de incompatibilidad trata de requisitos de seguridad y compatibilidad electromagnética lo que al presentarse las caídas de tensión producen un parpadeo. En luminarias de sodio estas caídas momentáneas de tensión se dan por problemas en el balasto y fluctuaciones de energía eléctrica como lo que se realizó en la simulación. Pero el parpadeo es más perceptible en luminarias LED.

En el análisis de la iluminancia se ha aplicado el método de la malla total y de los nueve puntos, siendo este último método el más favorable debido a que se realiza una malla entre dos postes y basta con calcular las iluminancias en una parte de la calzada ya que el resto son valores similares. Para comprobación de resultados se ha aplicado la malla total a lo largo de la calzada que contiene los tres postes dando resultados análogos de medición a los parámetros lumínicos empleados en el método de los nueve puntos.

Según la regulación vigente para este tipo de vía la luminancia promedio debe de ser de $\geq 0.8 \text{ cd/m}^2$ por lo que según los datos medidos la luminaria de sodio no cumple con esta condición, además del valor promedio de iluminación medido en lx para la clase de superficie (P1) está por debajo de 20 lux.

Por lo que el tipo de luz cálida que emite esta luminaria no da una buena visibilidad para peatones y vehículos. Al realizar la simulación en Dialux, los resultados fueron negativos comparando con los índices que exige la Regulación ARCERNNR 006/20.

En cambio, para la luminaria LED los valores de cálculo y simulación de luminancia e iluminancia cumplen con lo exigido en la normativa, así también se pudo observar que al realizar su encendido proyectan un mejor flujo luminoso hacia la calzada por su color de luz blanca dado así una mejor perspectiva de visibilidad en la zona.

Al darse el caso de que se presenten las perturbaciones eléctricas estudiadas en esta investigación el parpadeo será más perceptible en luminaria LED, pero por su buen flujo luminoso no afectara mucho la visibilidad de los peatones y vehículos que en ese momento circulan por la calzada, a diferencia en luminaria de sodio que por su menor flujo luminoso la visibilidad será baja en ese lapso que ocurre un Flicker o Sag.

En base a las mediciones se determinó que a medida que se agrega una luminaria más al circuito los valores de las perturbaciones eléctricas aumentan. El contenido armónico en las luminarias LED es mayor debido a que producen luz por la emisión de fotones, mientras que las de sodio para producir luz utilizan una descarga eléctrica en un gas produciendo así contenido armónico. Este armónico de voltaje (THDv) no siempre proviene de las luminarias sino también de fuentes externas y porcentaje armónico generado en la red de distribución.

Es por ello que las empresas eléctricas de distribución y consumidores realizan un análisis para determinar la presencia y magnitud de perturbaciones eléctricas que afectan a la red de distribución. Por lo que como una opción para disminuir el contenido armónico en luminarias LED han optado por el uso de un solo filtro, en tanto que en las de sodio se debe optar por filtros de mayor capacidad elevando así sus costos de mantenimiento.

Las gráficas resultantes de las mediciones y simulaciones han permitido obtener los resultados planteados en los objetivos de esta investigación en función de la comparación de las perturbaciones eléctricas que generan tanto las luminarias LED como las de sodio.

5.2 Recomendaciones

Todas las empresas distribuidoras de energía eléctrica deben brindar una buena calidad de energía para los consumidores y equipos conectados a la red eléctrica, pero existen equipos que producen perturbaciones que afectan a la red, como son las luminarias de tecnología LED ya que como se ha revisado en esta investigación y según la tabla 4.10, muestra porcentajes mayores de armónicos al comparar con la luminaria de sodio, debido al componente electrónico driver de los LEDs que producen más distorsión armónica, por lo que las empresas distribuidoras deben tener un plan de mantenimiento y corrección a estos dispositivos para así de alguna manera mantener los índices que exige la regulación vigente, o el uso de dispositivos como filtros que ayudan a minimizar el contenido armónico.

Otra recomendación es realizar mediciones en lapsos más largos de tiempo durante el día para así obtener valores de comportamiento de las perturbaciones eléctricas según las variaciones de demanda o si se conectan equipos de gran potencia a la red en la cual están conectadas las luminarias y en el que se está realizando la medición de parámetros, para así obtener más datos de medición y realizar un análisis del comportamiento de distorsiones que se pueden presentar en las luminarias durante un día completo.

Por último, se puede aplicar esta metodología a futuros casos de estudios en la que se apliquen diferentes tipos de cargas no lineales y estudiar su comportamiento en la red eléctrica, ya que a medida que avanza la tecnología en nuestro medio aparecen nuevos equipos eléctricos, controles electrónicos, que generan nuevas cargas no lineales que pueden afectar de alguna manera la calidad de energía.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T.A Edison. ELECTRIC LAMP, 1880.
- [2] Marty Cole and Tim Driscoll. The lighting revolution: If we were experts before, we're novices now. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2):1509–1520, mar 2014.
- [3] Andrés Franco, Luis Vega, and Wiliam Ramirez. Análisis de Distorsión Armónica en Iluminación led/analysis of harmonic distortion in Led lighting. *Revista vínculos*, 14:95, July 2017.
- [4] Sohel Uddin, Hussain Shareef, Azah Mohamed, and M A Hannan. An analysis of harmonics from LED lamps. In *2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pages 837–840, 2012.
- [5] Yandri Fabricio Pinargote Menéndez and Claudio Emilio Castro Morejón. Estudio de armónicos producidos por la iluminación tipo fluorescente y LED en un aula del bloque B de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. B.S. thesis, 2018.
- [6] Juan Gabriel Matute Heredia and Luis Miguel Ayala Pérez. Análisis del efecto que producen los armónicos en la red eléctrica generados por distintas cargas lumínicas tipo LED usados para interiores. B.S. thesis, 2021.
- [7] Mayté Carolina Brusil Guamán. Análisis de perturbaciones armónicas producidas por luminarias de tecnología LED en una red de alumbrado público. B.S. thesis, Quito, 2020., 2020.
- [8] Luis Fernando Bedoya Ayora. Modelado del THD en los sistemas de iluminación de inducción residenciales. B.S. thesis, 2015.
- [9] M.A. Dalla Costa, R.N. Do Prado, A.R. Seidel, and F.E. Bisogno. Performance analysis of electronic ballasts for compact fluorescent lamp. In *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)*, volume 1, pages 238–243 vol.1, 2001.
- [10] Richard J. Bravo and Nagy Y. Abed. Experimental evaluation of the harmonic behavior of LED light bulb. In *2013 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–4, 2013.

- [11] Carlos David Murillo Andrade and Kevin David Paucar Flores. Análisis de armónicos en la iluminación led de sistemas de alumbrado público en la ciudad de Ambato Av. Luis Aníbal Granja Sector Huachi Chico. B.S. thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)., 2019.
- [12] Diego Bastidas. Análisis de Perturbaciones Rápidas de Voltaje (Flicker) y su incidencia en el comportamiento operativo dentro del área de concesión de la Corporación Nacional de Electricidad Bolívar. resreport, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga, March 2021.
- [13] Willian Edison Laguna Saquinga. Evaluación del riesgo lumínico en el área de aparato en la empresa Calzado gamo's. B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas . . . , 2017.
- [14] Miguel Paul Castro Guaman and Norman Christos Posligua Murillo. Diseño de iluminación con luminarias tipo Led basado en el concepto eficiencia energética y confort visual, implementación de estructura para pruebas. B.S. thesis, 2015.
- [15] Rubén Corvalán, Sanabria Norberto, Ferrari Elvira, Titiosky Valeria, Amarilla Alicia, Cuevas Alicia, Sabaj Victor, and Fleitas Hernán. Aplicación de criterios de optimización energética y seguridad en la iluminación y confort, en calles y avenidas. 2019.
- [16] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables. Regulación Nro. ARCERNR 006/20. 2020.
- [17] Asociación Española de Normalización (UNE). UNE-EN 60598-1:2015: Luminarias. Parte 1: Requisitos generales y ensayos. July 2015.
- [18] Fausto Patricio Granda Delgado. Estudio técnico-económico de los sistemas de alumbrado público. B.S. thesis, Quito: EPN, 1982., 1982.
- [19] Miguel Angel Ramirez. *Eficiencia Energética*. España, 1 edition, 2020.
- [20] Darío Alberto Martínez Victoria. Balastro Electrónico Mono-etapa. B.S. thesis, Universidad de las Américas Puebla, México, December 2005.
- [21] Jorge Fraile Alfonso Gago. *Iluminación con tecnología LED*. España.
- [22] Alumbrado Público LED. Technical report, DUMALUX, 2018.
- [23] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Std 1159-2019 (Revisión of IEEE Std 1159-2009)*, pages 1–98, 2019.
- [24] IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2022 (Revisión of IEEE Std 519-2014)*, pages 1–31, 2022.
- [25] Asociación Española de Normalización (UNE). UNE-EN 61000-4-7:2004: Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas. May 2004.

- [26] Lopez Osorio Heber Augusto. Método de caracterización de luminarias de alta descarga tipo metal halide ante eventos de corta duración (SAG) en la señal de alta tensión, 2014.
- [27] Marcos Holguin and David Gómez Coello. Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana. B.S. thesis, 2010.
- [28] W. Mombauer. Flicker-simulation and minimization. In *10th International Conference on Electricity Distribution, 1989. CIRED 1989*, pages 102–106 vol.2, 1989.
- [29] Hugo Ramiro Pila Pila and Manuel Iván Zambrano Reasco. Estudio del Flicker en una instalación eléctrica. B.S. thesis, 2010.
- [30] Asociación Española de Normalización (UNE). UNE-EN IEC 61000-3-2: Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2, Límites: límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada [menor igual] 16 A por fase). April 2019.
- [31] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables. Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica. Regulación Nro. ARCERNNR 002/20. 2023.
- [32] IEEE Standard for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems. *IEEE Std 1453-2022 (Revision of IEEE Std 1453-2015)*, pages 1–83, 2022.
- [33] Asociación Española de Normalización (UNE). UNE-EN 50160:2011/A2:2020: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución. June 2020.
- [34] FLUKE. *Fluke 434-II/435-II/437-II*. Fluke Corporation, Everett, Washington, USA., January 2012.
- [35] Wout van Bommel. El espectro de las fuentes de luz y bajos niveles de iluminación: fundamentos.
- [36] Asociación Española de Normalización (UNE). UNE-EN 13201-2:2016: Iluminación de carreteras. Parte 2: Requisitos de prestaciones. December 2016.
- [37] Ministerio de Industrias y Productividad. REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 069 “ALUMBRADO PÚBLICO”. 2013.
- [38] Juan Gabriel Barros López and Adriana Yolanda Troncoso Salgado. Iluminación automática de los espacios verdes y áreas de circulación de la ESFOT controlado por un PLC y un tablero de control. B.S. thesis, Escuela Politécnica Nacional, 2006.