

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LUMINARIAS LED DIMERIZABLES RESIDENCIALES EN LA CALIDAD DEL PRODUCTO EN UNA RED ELÉCTRICA DE BAJO VOLTAJE

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

WILMAN JOEL ARÉVALO POZO

DIRECTOR: DR. ING. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ

Quito, Enero 2022

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wilman Joel Arévalo Pozo, bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Gabriel Benjamín Salazar Yépez
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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

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

WILMAN JOEL ARÉVALO POZO

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a mis padres, por todo el esfuerzo que hacen por sacarme adelante. Este logro también es de ellos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, por su apoyo incondicional. A mis hermanos, y demás familiares, que siempre me han brindado su ayuda.

Un agradecimiento especial al Dr. Gabriel Salazar, por su ayuda en la realización del presente trabajo de titulación. Así como también, por los valiosos conocimientos transmitidos en el aula de clase.

Al M.Sc. Francisco Espín, por facilitarme las instalaciones del laboratorio para la realización de este trabajo de titulación.

A la Escuela Politécnica Nacional, por haberme forjado como un profesional con principios éticos y morales.

Agradezco a dios, por haberme bendecido con personas maravillosas que siempre me han brindado su apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 ALCANCE	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 MARCO TEÓRICO.....	5
1.4.1. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	5
1.4.1.1 Calidad de servicio técnico	5
1.4.1.2 Calidad de producto técnico	5
1.4.1.3 Calidad del servicio comercial	6
1.4.2. TIPOS DE CARGAS ELÉCTRICAS.....	6
1.4.2.1. Cargas lineales.....	6
1.4.2.2. Cargas no lineales.....	6
1.4.3. ARMÓNICOS	6
1.4.4. FUENTES DE ARMÓNICOS	7
1.4.4.1 Transformadores.....	8
1.4.4.2 Máquinas rotativas.....	9
1.4.4.3 Lámparas fluorescentes (con balastro magnético)	10
1.4.4.4 Rectificadores monofásicos.....	11
1.4.4.5 Conversión trifásica.....	12
1.4.4.5.1 Rectificador de 6 pulsos	12
1.4.4.5.2 Rectificador de 12 pulsos	13
1.4.4.6 Luminarias LED	13
1.4.4.7 Otras cargas no lineales residenciales.....	14

1.4.5.	ILUMINACIÓN	14
1.4.5.1	Iluminación natural	14
1.4.5.2	Iluminación artificial.....	15
1.4.5.3	Lámparas LED	16
1.4.5.4	Principio de Funcionamiento de Lámparas LED.....	17
1.4.5.5	Dimerización de LED.....	18
1.4.5.5.1	Dimerización por modulación de amplitud (MA).....	18
1.4.5.5.2	Dimerización por modulación de ancho de pulso (PWM)	19
1.4.5.6	Normativa para luminarias LED.....	19
1.4.6.	MODELOS DE FUENTES DE CORRIENTE DE LUMINARIAS LED DIMERIZABLES	20
1.4.6.1	Introducción	20
1.4.6.2	Modelización como fuentes de corriente	21
1.4.6.3	Modelización de luminarias LED dimerizables	23
1.4.6.4	Herramientas computacionales	24
1.4.7.	MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS	24
1.4.7.1	Métodos de Mitigación	26
1.4.7.1.1	Transformadores en ZigZag.....	26
1.4.7.1.2	Uso de transformadores en conexión Delta-Y	26
1.4.7.1.3	Transformadores con distinto grupo de conexión.....	28
1.4.7.1.4	Inductancias de choque	28
1.4.7.1.5	Aumento del calibre del conductor.....	30
1.4.7.1.6	Uso de transformadores factor K.....	30
1.4.7.1.7	Desclasificación de Transformadores	31
1.4.7.1.8	Aumento del número de pulsos en convertidores	32
1.4.7.1.9	Filtros.....	33
1.4.7.1.9.1	Filtros Pasivos.....	33
1.4.7.1.9.1.1	Filtros Pasivos Shunt	34
1.4.7.1.9.1.2	Filtro Pasivo Serie.....	35
1.4.7.1.9.2	Filtro Activo	36
1.4.8.	DIALUX EVO	37
1.4.9.	ESTUDIO ECONÓMICO	39
1.4.9.1.	Valor del dinero en el tiempo.....	39
1.4.9.2.	Flujo de fondos	39
1.4.9.3.	Valor actual neto (VAN).....	40
1.4.9.4.	Tasa interna de retorno (TIR)	41

2. METODOLOGÍA	42
2.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL DE DOS DEPARTAMENTOS REPRESENTATIVOS	43
2.1.1. ESTUDIO PRELIMINAR	44
2.1.2. PLANIFICACIÓN INICIAL	44
2.1.3. DISEÑO ESPECÍFICO	45
2.1.3.1. Cálculo de la cantidad de luminarias.....	45
2.1.3.2. Diseño con DIALux.....	46
2.1.4. DOCUMENTACIÓN	47
2.2. MEDICIÓN	47
2.2.1. CIRCUITO DE MEDICIÓN	47
2.2.2. EQUIPO DE MEDICIÓN.....	48
2.2.3. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	49
2.2.3.1. Ensayos de laboratorio.....	50
2.2.3.2. Ensayos adicionales.....	51
2.3. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	51
3. APLICACIÓN METODOLÓGICA	53
3.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN	53
3.1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	53
3.1.2. PRESTACIONES DE LOS DEPARTAMENTOS.....	53
3.1.3. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS.....	54
3.1.3.1. Dimensiones.....	54
3.1.3.2. Planos arquitectónicos	55
3.1.3.3. Texturas.....	57
3.1.4. NORMATIVA	59
3.1.5. SELECCIÓN DE LUMINARIAS.....	60
3.1.6. CÁLCULO LUMINOTÉCNICO.....	62
3.1.7. DOCUMENTACIÓN	64
3.1.7.1. Renderizado	68
3.1.7.2. Colores falsos	68
3.1.7.3. Curvas Isolux.....	70
3.2. MEDICIÓN CONTENIDO ARMÓNICO	71
3.2.1. POTENCIA MÁXIMA.....	71
3.2.2. POTENCIA NOMINAL	74
3.2.3. POTENCIA MÍNIMA.....	77

3.2.4.	COMPARATIVA ENTRE LOS TRES ESTADOS DE DIMERIZACIÓN	80
3.2.5.	COMPARATIVA ENTRE TODAS LAS LUMINARIAS	84
3.2.6.	MEDICIÓN PARA EL DISPOSITIVO DE DIMERIZACIÓN	85
3.2.7.	MEDICIÓN EN PARALELO.....	86
3.2.8.	FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE	87
3.2.7.1.	Potencia Máxima.....	87
3.2.7.2.	Potencia Nominal	88
3.2.7.3.	Potencia Mínima	90
3.3	MITIGACIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO	91
3.3.1.	ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO	91
3.3.2.	ESTIMACIÓN DE LA INYECCIÓN ARMÓNICA TOTAL	92
3.3.3.	MODELACIÓN	95
3.3.4.	DISEÑO DEL FILTRO	96
3.4	ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO	98
3.4.1.	CONSIDERACIONES PRELIMINARES.....	98
3.4.2.	AHORROS.....	99
3.4.3.	COSTOS.....	103
3.4.4.	FLUJO DE FONDOS.....	103
3.4.5.	VALOR ACTUAL NETO	104
3.4.6.	TASA INTERNA DE RETORNO.....	105
3.4.7.	RELACIÓN BENEFICIO COSTO	105
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
4.1	CONCLUSIONES.....	107
4.2	RECOMENDACIONES	108
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
	ANEXOS	115

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene el propósito de determinar el impacto que provocan las luminarias LED con dimerización utilizadas en aplicaciones residenciales en la calidad del producto eléctrico, específicamente la inyección de corrientes armónicas, debido a que se prevé un incremento considerable en la utilización de este tipo de luminarias debido al ahorro energético que permiten. Para estimar dicho impacto, se han realizado mediciones de laboratorio para luminarias de diferentes fabricantes y potencias, para tener una visión más amplia del problema. Adicionalmente, las mediciones han sido efectuados para tres estados de dimerización diferentes, con la finalidad de apreciar el efecto de la dimerización en la magnitud de las componentes armónicas.

Para llevar a cabo la realización del trabajo de titulación, se ha diseñado el sistema de iluminación artificial de dos departamentos representativos empleando el software de propósito específico DIALux Evo. El diseño posibilitó el cálculo del número de luminarias que se necesitan para cada departamento, así como también permitió estimar el consumo energético anual por parte de los sistemas de iluminación. Con base a esto, se propuso medidas para mitigar las corrientes armónicas que se prevé serán inyectadas por las luminarias LED con dimerización de dichos departamentos. Adicionalmente, se desarrolló el análisis técnico y económico de la implementación de filtros pasivos en los sistemas de iluminación de cada departamento, para precisar si es viable o no.

PALABRAS CLAVE: Dimerización de lámparas LED, armónicos de luminarias, mitigación de armónicos, corrientes armónicas, sistemas de iluminación.

ABSTRACT

The purpose of this degree project is to determine the impact provoked by dimmable LED lamps used in residential applications, in the electrical product quality, especially the harmonic current injection. The utilization of these type of lamps, is going to increase considerably in the next years, due to the energy savings achieved with the dimmable LED lamps system. Laboratory measurements were performed to lamps form different brands and wattages in order to estimate the influence in the harmonic current injection. Moreover, three samples with different power rating were made for each lamp, with the objective of analyzing the harmonic distortion caused by the dimming operation.

For the realization of this degree project, the artificial illumination systems, for two representative apartments, were designed using the computational software DIALux Evo. The design made it possible to calculate the number of lamps needed for each apartment and the energy consumption estimated per year due to the illumination systems. Based on this, mitigation measurements for the harmonic currents provoked by dimmable LED lamps were proposed. Furthermore, the technical and economic analysis for the installation of low passive filters in the illumination systems of each apartment was developed, in order to establish if it is viable or not.

KEYWORDS: Dimmable LED lamps, harmonics in lamps, harmonic mitigation, harmonic currents, illumination systems.

1. INTRODUCCIÓN

La iluminación artificial representa aproximadamente el 20% de la demanda de energía eléctrica a nivel mundial, según varias estimaciones realizadas, y las lámparas incandescentes han sido la principal fuente de iluminación artificial por muchos años, sin embargo, estas lámparas presentan una eficiencia muy baja ya que la mayor parte de la energía es disipada como calor, con lo cual no pueden entregar los lúmenes necesarios para una iluminación adecuada [1]. Debido a esto se han impulsado medidas que permitan reemplazar las lámparas incandescentes, por lámparas fluorescente compactas y LED [2].

Con el desarrollo tecnológico actual, las luminarias LED han incursionado en el mercado de la iluminación artificial en poco tiempo como una propuesta con alta eficiencia energética, durabilidad y una gran variedad de productos, lo cual las convierte en una opción ideal para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales [3].

Las ventajosas características de dichas luminarias han sido logradas por el gran avance tecnológico en el desarrollo de materiales semiconductores en los últimos años.

Recientemente se ha incrementado el uso de lámparas LED con dimerización en residencias, como un sistema de iluminación con mayor eficiencia energética, ya que permite variar el nivel de iluminación artificial dependiendo de las necesidades humanas, tales como: disminución del consumo de energía, mayor confort visual, entre otros. De igual manera, en sistema de iluminación arquitectónicos la regulación del nivel de iluminación es esencial para lograr los requerimientos estéticos del lugar [4].

Se ha reportado que el aprovechamiento de la luz de día, acompañado con un sistema de iluminación LED con dimerización, permite un ahorro de energía de alrededor de 30-40% [5].

La dimerización tiene cierta complejidad y se logra con el control de la corriente eléctrica, cuyo valor influye directamente en el flujo luminoso entregado por la luminaria, en la actualidad en la mayoría de sistemas de iluminación residenciales con dimerización el control del flujo luminoso se realiza mediante la modulación de ancho de pulso, también conocida como PWM, dicha modulación permite controlar el nivel de iluminación cambiando el ciclo de trabajo, para realizar esto los sistemas de iluminación requieren de varios componentes tales como: un filtro para bloquear el ruido generado por la conmutación del circuito, un circuito rectificador con capacitor suavizado, y un convertidor DC-DC con control de corriente constante, todos estos son construidos con materiales semiconductores que se comportan como cargas no lineales, debido a que las potencias

nominales de las luminarias LED son bajas, los sistemas pueden o no tener circuitos de control de factor de potencia [6].

Todos estos componentes que conforman los sistemas de dimerización de luminarias LED, causan un impacto desfavorable importante en la calidad del producto eléctrico, el cual debe ser considerado y analizado con prolijidad, debido a que este tipo de iluminación está incursionando raudamente en la actualidad, y se espera un incremento aún mayor en su utilización en los próximos años.

Este tipo de luminarias LED, debido a la gran cantidad de componentes no lineales que las componen, tales como transistores y diodos, producen distorsiones armónicas que ingresan a la red de distribución de energía eléctrica, estas distorsiones vienen acompañadas también de una disminución en el factor de potencia y flickering, afectando así a la calidad del producto eléctrico [7].

Debido a esto, se prevé que con el ingreso masivo de luminarias LED con dimerización en los sistemas de iluminación residencial, se provocarán perturbaciones de la calidad del producto en las redes de bajo voltaje, estudiar detalladamente estas perturbaciones y sus soluciones, evitará que los límites de emisión sean superados. Si no se realiza esta investigación sobre el tema, los sistemas de iluminación podrían convertirse en una fuente importante de contaminación de la calidad del producto.

Dicha contaminación contiene una alta distorsión armónica que se inyectaría a la red, la cual provoca efectos muy perjudiciales, tales como: pérdidas innecesarias de energía en el sistema eléctrico, sobrecarga del neutro en instalaciones eléctricas, pérdida de vida útil de equipos electrónicos y eléctricos, entre otros [8].

Este estudio integral será realizado en el Laboratorio de Luminotecnia del Instituto de Investigación Geológica y Energética, mismo que cuenta con los equipos de medición calibrados adecuadamente, los cuales serán utilizados para evaluar diversas luminarias LED, se medirán parámetros eléctricos importantes de las luminarias tales como: potencia consumida, factor de potencia, formas de onda de voltaje y corriente, distorsiones armónicas totales de voltaje y corriente.

Todos los parámetros eléctricos mencionados, serán medidos para luminarias LED de diversos fabricantes, con estados de dimerización diferentes, y con conexión de luminarias en paralelo, para poder apreciar el efecto que tiene la utilización de un mayor número de luminarias.

Con los parámetros obtenidos de las mediciones se procederá a caracterizar los armónicos inyectados a la red por parte de este tipo de luminarias, y propondrán medidas para reducirlos, ya que se tiene previsto que este tipo de luminarias en un futuro cercano acaparen la mayoría del mercado por su precio asequible y alta eficiencia energética [9].

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es: Realizar un estudio integral de los efectos que producen en la calidad del producto eléctrico las luminarias LED dimerizables usadas en iluminación artificial residencial, para así proponer medidas adecuadas que permitan mitigar estos efectos.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Diseñar y simular del sistema de iluminación de un departamento representativo usando el software especializado DIALux Evo.
- Medir los parámetros eléctricos relevantes en la calidad del producto eléctrico de diversas luminarias LED dimerizables, usando un analizador de la calidad del producto eléctrico.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos mediante las mediciones de las diferentes luminarias LED estudiadas, para caracterizar la distorsión armónica generada.
- Proponer medidas para reducir la afectación de las luminarias estudiadas en la calidad del producto eléctrico.
- Realizar una evaluación técnica y económica de las medidas de mitigación propuestas.

1.2 ALCANCE

El trabajo de titulación propuesto se enfoca en un estudio integral para determinar el impacto en la calidad de energía por el uso de luminarias LED con dimerización, para lo cual se realizarán medidas a diversas luminarias LED con el uso de un analizador de redes, se medirán parámetros eléctricos importantes de las luminarias tales como: potencias consumidas, factor de potencia, formas de onda de voltaje y corriente, distorsiones armónicas totales de voltaje y corriente.

En principio se va a realizar el diseño del sistema de iluminación para un departamento representativo, y se simulará utilizando el software DIALux, para lo cual se utilizará toda la normativa existente para el diseño de sistemas de iluminación, misma que considera aspectos como reflectividad del ambiente, factor de utilización de las luminarias, factor de depreciación, flujo luminoso requerido por tipo de habitación, y dimensiones del departamento.

A continuación, serán realizadas mediciones a luminarias LED de diversos fabricantes, y se medirán los parámetros eléctricos importantes antes mencionados para: a) Luminarias LED en estado no dimerizado, b) Luminarias LED en estado dimerizado. Así como también se realizarán mediciones con luminarias conectadas en paralelo, para poder apreciar el efecto que tiene el uso de un mayor número de luminarias conectadas, y se tomarán medidas para diferentes estados de dimerización.

Una vez realizadas las mediciones, se procederá al análisis de los resultados obtenidos, para poder caracterizar la inyección armónica por parte de las luminarias LED con dimerización a la red, la cual afecta a la calidad del producto eléctrico, y así proponer medidas adecuadas para poder mitigar el impacto del contenido armónico de una manera eficiente.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El rápido incremento en el uso de lámparas LED con dimerización para iluminación de residencias, conlleva a realizar un estudio integral sobre los efectos que estas producen sobre la red de distribución de energía eléctrica, debido a que se estima que la iluminación artificial representa el 20% del consumo total de electricidad a nivel mundial, y un 14% en el Ecuador [10].

Los sistemas de dimerización de las luminarias LED, tiene una gran complejidad en su construcción interna, y están conformados por una gran cantidad de elementos no lineales, los cuales generan distorsión armónica en la red, debido a que estos elementos se comportan como cargas no lineales, las cuales consumen corrientes no lineales.

El presente trabajo de titulación va a permitir conocer los efectos negativos en la calidad del producto eléctrico que son provocados por el uso de luminarias LED con dimerización en aplicaciones residenciales, con un enfoque en la inyección de armónicos de voltaje y corriente hacia la red, la cual debe ser caracterizada de una manera correcta y prolija.

Conociendo los efectos causados, y sus características, es posible tomar las medidas necesarias para reducir su impacto, y de ser posible mitigarlos, para así evitar daños y pérdidas en la red.

Existen varios métodos de mitigación de armónicos, sin embargo, es necesario caracterizar la distorsión armónica adecuadamente para poder determinar cuál, o cuales métodos son más factibles, tanto técnica como económicamente, para el presente caso de estudio.

1.4 MARCO TEÓRICO

Este apartado expone la información teórica que se tomará como base para la realización del presente trabajo de titulación. Primeramente, se presentan conceptos referentes a la calidad de la energía eléctrica, para luego listar las diferentes fuentes que provocan la inyección de componentes armónicas. Posteriormente, se establecen los conceptos fundamentales de iluminación. Luego, se detallan los métodos que existen para mitigar el contenido y reducir su afectación para la calidad del producto eléctrico. Y, finalmente, se describen las características relevantes del software DIALux Evo, el cual es el software de propósito específico preferido por profesionales en iluminación.

1.4.1. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La calidad de energía eléctrica es un concepto muy amplio, que engloba tres aspectos muy importantes que se detallan a continuación.

1.4.1.1 Calidad de servicio técnico

Se refiere al nivel de confiabilidad y continuidad con la que se brinda el servicio de suministro eléctrico al consumidor. Es necesario calcular ciertos indicadores para estimar la percepción que tiene el usuario con respecto a la continuidad del suministro. Para obtener dichos indicadores se considera el número y duración de las interrupciones del suministro, así como también la potencia nominal aparente instalada, y la potencia aparente desconectada [11].

1.4.1.2 Calidad de producto técnico

Se relaciona con el conjunto de parámetros técnicos mínimos que debe tener la energía eléctrica que llega al consumidor, tales como: nivel de frecuencia, nivel de voltaje, forma de onda, entre otros. Existen varios fenómenos perturbadores que afectan a la calidad del producto eléctrico, entre los más relevantes se encuentran los armónicos, los cuales serán analizados en este proyecto de titulación.

1.4.1.3 Calidad del servicio comercial

Se refiere al conjunto de servicios comerciales de la empresa proveedora del suministro eléctrico, para con el consumidor, actividades como: atención al usuario, tiempos de respuesta a reclamos o consultas, estimación en la facturación, plazos de conexión a nuevos usuarios, reconexión del servicio suspendido, facilidades de pago, entre otros. Dichos servicios proveen al consumidor un nivel de satisfacción apropiado [11].

1.4.2. TIPOS DE CARGAS ELÉCTRICAS

1.4.2.1. Cargas lineales

Cargas lineales son aquellas que, al ser alimentadas con un voltaje senoidal, consumen una corriente puramente senoidal. Antiguamente las cargas del sistema eléctrico eran únicamente lineales, como por ejemplo motores eléctricos, transformadores, calentadores resistivos, entre otras.

1.4.2.2. Cargas no lineales

El término carga no lineal se refiere a las cargas que, al tener un voltaje de alimentación senoidal, consume una corriente no senoidal, ejemplos de cargas no lineales son los dispositivos electrónicos, tales como computadores, focos LED, entre otros. Actualmente la mayoría de las cargas residenciales, son no lineales.

1.4.3. ARMÓNICOS

La generación de energía eléctrica se realiza comúnmente a 50Hz o 60Hz, y la fuerza electromotriz del generador es considerada prácticamente senoidal. Sin embargo, cuando se alimenta una carga o dispositivo no lineal con un voltaje senoidal, la corriente resultante no será totalmente senoidal y presentará cierto grado de distorsión.

Los armónicos se definen como señales de voltaje y corriente con una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental, estas señales se suman a la onda fundamental de voltaje y corriente, distorsionándola, con lo cual se reduce la calidad del producto eléctrico, como se muestra en la Figura 1.1.

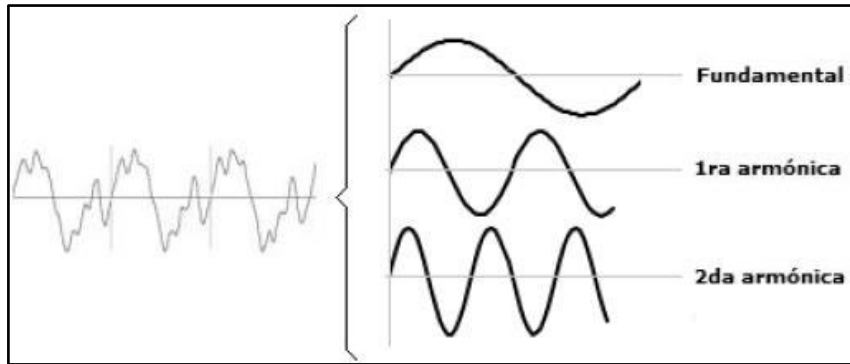


Figura 1.1. Onda fundamental, sus primeras armónicas y la suma de éstas [12]

Las corrientes armónicas no producen un trabajo útil, por lo cual se convierten en una pérdida de potencia y energía.

Aparte de no generar un trabajo útil, los armónicos causan una gran distorsión en las ondas de voltaje y corriente. Estas distorsiones son causantes de varios efectos negativos, las cuales se listan a continuación:

- Notches de voltaje en equipos electrónicos de potencia.
- Mal funcionamiento de equipos electrónicos.
- Sobrecalentamiento de equipos.
- Vibración de motores.
- Ruido audible en transformadores y máquinas rotativas.
- Operación indebida de equipos de protección.
- Funcionamiento inadecuado del regulador de voltaje.
- Funcionamiento inadecuado del regulador del generador.
- Funcionamiento inadecuado en dispositivos basados en microprocesadores.
- Incendios eléctricos [13].

1.4.4. FUENTES DE ARMÓNICOS

Los armónicos son generados por cargas no lineales, o por dispositivos que consumen corrientes no lineales.

El gran aumento en la utilización de dispositivos de electrónica de potencia en el control de equipos y sistemas de potencia es la principal razón por la cual ha existido un incremento considerable y preocupante en la distorsión armónica en la actualidad.

Sin embargo, las cargas no lineales no son las únicas causantes del apareamiento de armónicos, a continuación, se detallan los equipos lineales que han sido fuentes de armónicos desde hace muchos años atrás.

1.4.4.1 Transformadores

Los armónicos generados en los transformadores se deben a las características no lineales de la magnetización del acero, del cual está formado su núcleo.

Los transformadores se diseñan generalmente para operar justo por debajo del codo de saturación, y la densidad de flujo con la que debe operar se selecciona en base a un arduo análisis de optimización considerando el costo del acero, las pérdidas sin carga, el ruido, entre otros.

Debido a las costosas sanciones que puede conllevar el tener ruido y pérdidas sin carga, que sobrepasan los límites establecidos, generalmente se utiliza más acero en el núcleo, y una curva de saturación más alta, lo que conlleva a tener corrientes armónicas más bajas. Sin embargo, la corriente de excitación de los transformadores presenta un alto contenido armónico, del orden del 1% de la corriente nominal a plena carga; estos valores son bajos en comparación a otras fuentes de armónicos, no obstante, se vuelven un gran problema en sistemas de distribución en los cuales se tiene una gran cantidad de transformadores en operación [14].

Existe un aumento en las corrientes armónicas triples, cuando el transformador opera con cargas pequeñas, esto debido a que los voltajes de operación en estas circunstancias son mucho mayores.

A continuación, en la Figura 1.2 se muestra el espectro armónico para un transformador trifásico, como se puede apreciar tiene un valor considerable en el tercer armónico.

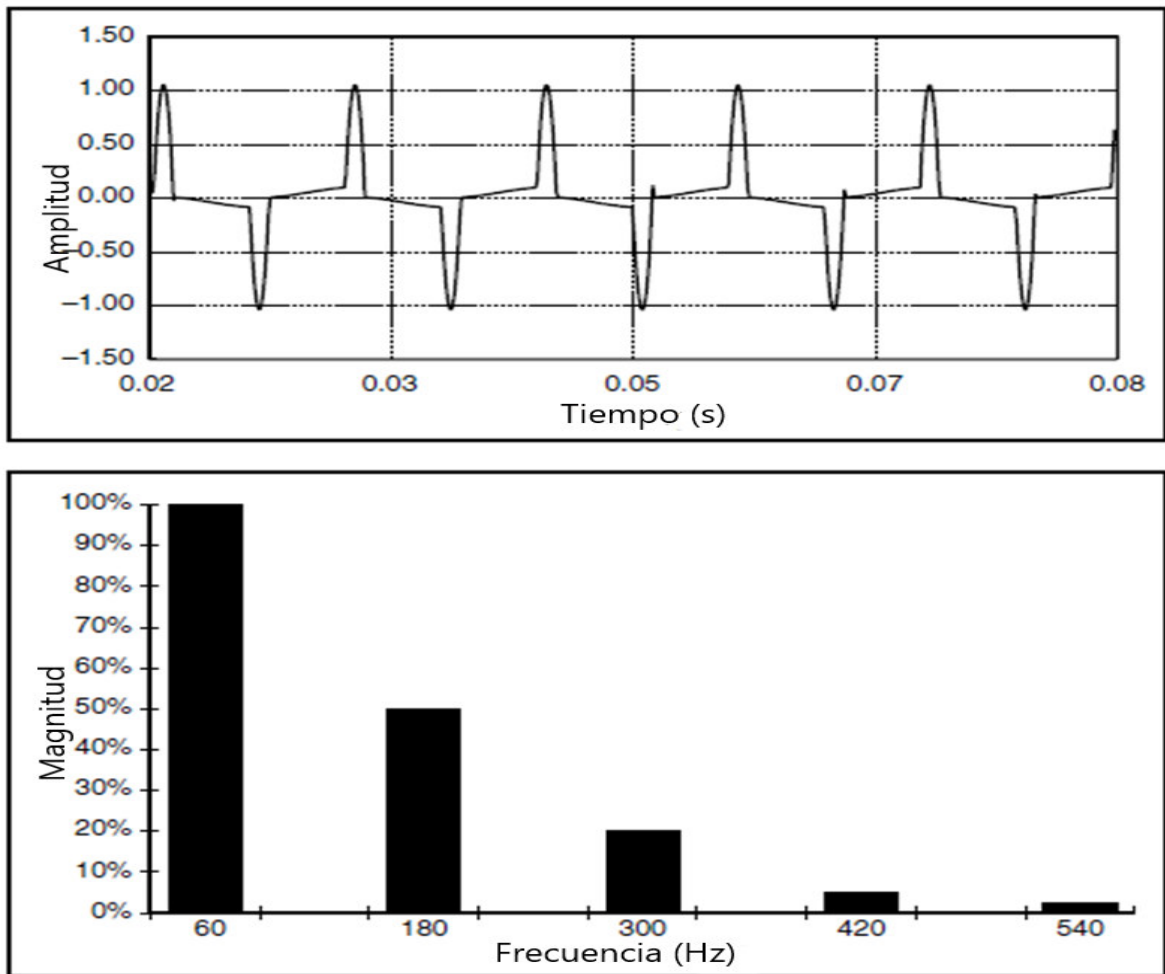


Figura 1.2. Corriente de magnetización del transformador y su espectro armónico [14]

1.4.4.2 Máquinas rotativas

El apareamiento de armónicos en este tipo de máquinas se produce debido a imperfecciones muy pequeñas en las ranuras del rotor, disimetrías en los devanados o en el estator de la máquina, especialmente cuando el motor es trifásico. La saturación del hierro presente en el estator o a su vez en el rotor, también provoca el apareamiento de armónicos en máquinas rotativas [15].

La densidad de flujo máxima con la que operan está justo por debajo del codo de saturación, de manera similar que en los transformadores.

El valor del contenido armónico difiere entre los diferentes tipos de máquinas rotativas, por ejemplo, en los generadores sincrónicos se tiene que el tercer armónico de corriente es del 30%, mientras que en los motores monofásicos la distorsión armónica total de corriente es del orden del 10%, con una predominancia por parte del tercer armónico. La forma de onda de corriente de un aire acondicionado residencial se presenta en la Figura 1.3.

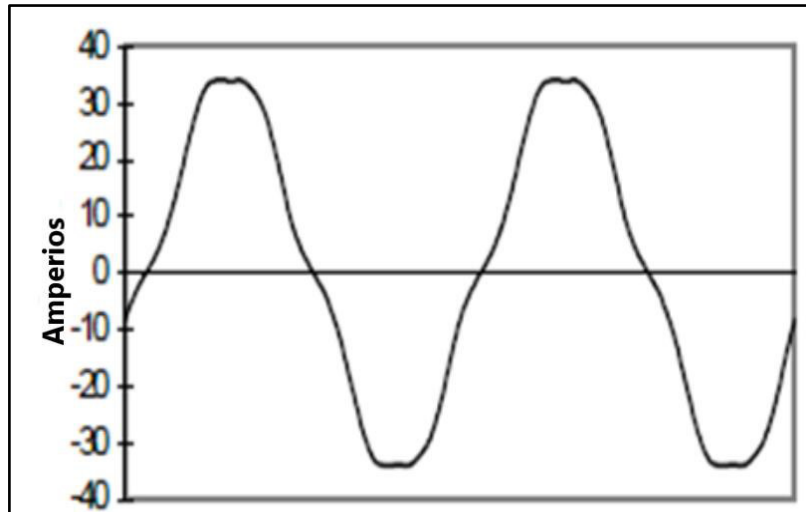


Figura 1.3. Corriente de aire acondicionado residencial a 240V. $THDI=10.5\%$ [15]

1.4.4.3 Lámparas fluorescentes (con balastro magnético)

La operación de este tipo de lámparas tiene una característica extremadamente no lineal, con lo cual se tiene un incremento considerable en las corrientes componentes armónicas de orden impar, principalmente del tercer armónico, el cual está en el orden del 15% al 20% de la fundamental[15]. En la Figura 1.4 se muestra la forma de onda de la corriente de una lámpara fluorescente.

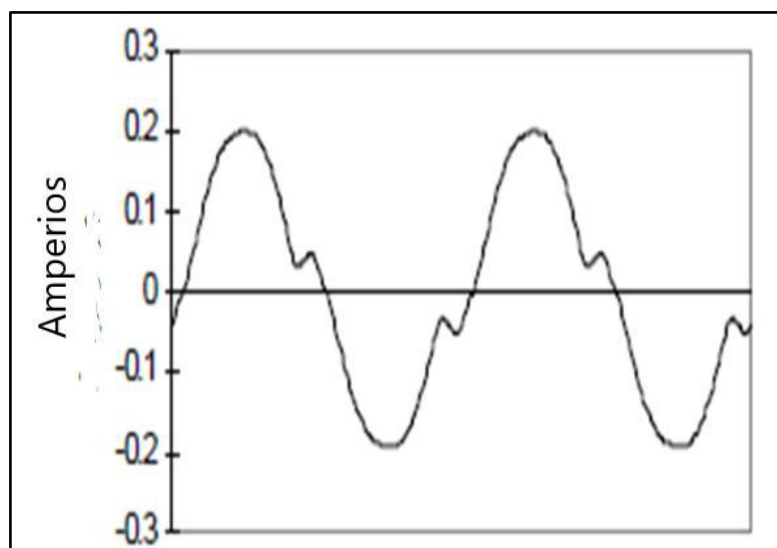


Figura 1.4. Corriente de lámpara fluorescente de 277V (con balastro magnético)
 $THDI=18.5\%$ [15]

1.4.4.4 Rectificadores monofásicos

La corriente directa es utilizada para alimentar varios dispositivos en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. El rectificador de puente diodos monofásico es muy usado en este tipo de aplicaciones debido a que es económico y no se ve afectado fácilmente por variaciones en el voltaje de alimentación, en condiciones normales de operación [16].

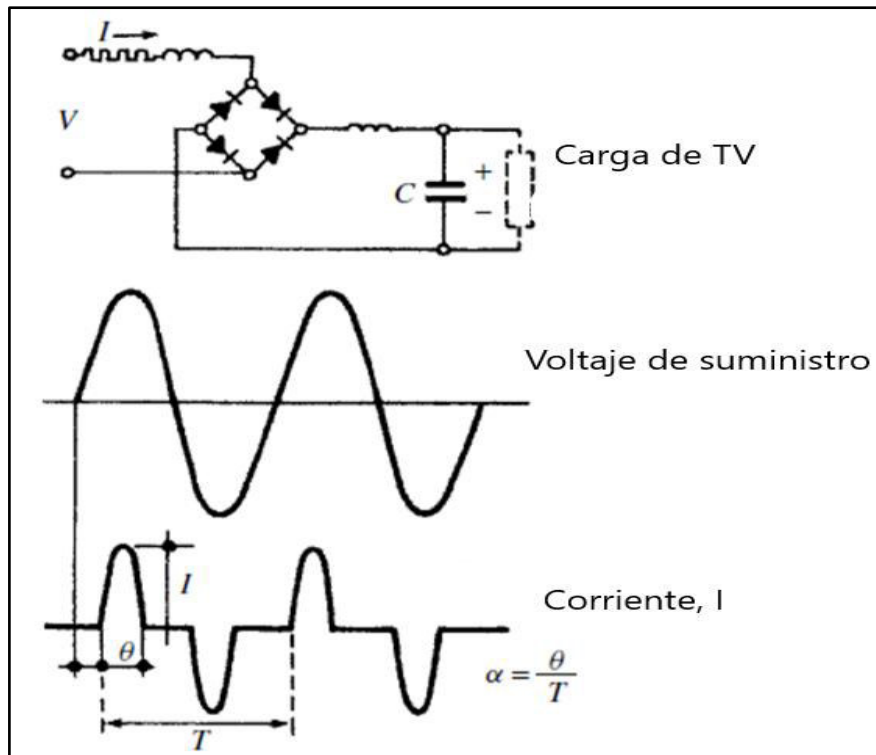


Figura 1.5. Puente rectificador monofásico de diodos con filtrado por condensador [16]

Al alimentar un puente rectificador de diodos con una fuente AC, con un capacitor conectado en paralelo a la carga, se genera corrientes muy angostas en cada medio ciclo, esto debido a que el capacitor se carga solamente cuando la fuente de voltaje supera el valor del nivel DC [12]. En la Figura 1.6 se expone un puente rectificador de diodos con filtrado por condensador.

La Ecuación 1.1 representa los pulsos de corriente con Series de Fourier.

$$I_n = \frac{8\alpha I}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\cos(n\alpha\pi)}{1 - n^2\alpha^2\pi^2} \cos(n\omega t) \quad (1.1)$$

Donde: I es el valor pico de la corriente, y $\alpha = \theta/T$, que representa su duración como proporción de la onda fundamental.

El principal problema causado por estos rectificadores es la generación del tercer armónico, el cual se suma aritméticamente al neutro en una conexión trifásica [12].

1.4.4.5 Conversión trifásica

Una de las principales ventajas de los convertidores trifásicos con respecto a los rectificadores monofásicos es que los trifásicos no generan el tercer armónico de corriente, lo cual es muy importante debido a que el tercer armónico es el más grande [14].

Los conversores trifásicos tienen la característica de presentar un lado DC mucho más inductivo que el lado AC.

Existen algunos tipos de conversores trifásicos tales como:

1.4.4.5.1 Rectificador de 6 pulsos

En la Figura 1.7 se presenta un variador de velocidad construido con un rectificador de 6 pulsos.

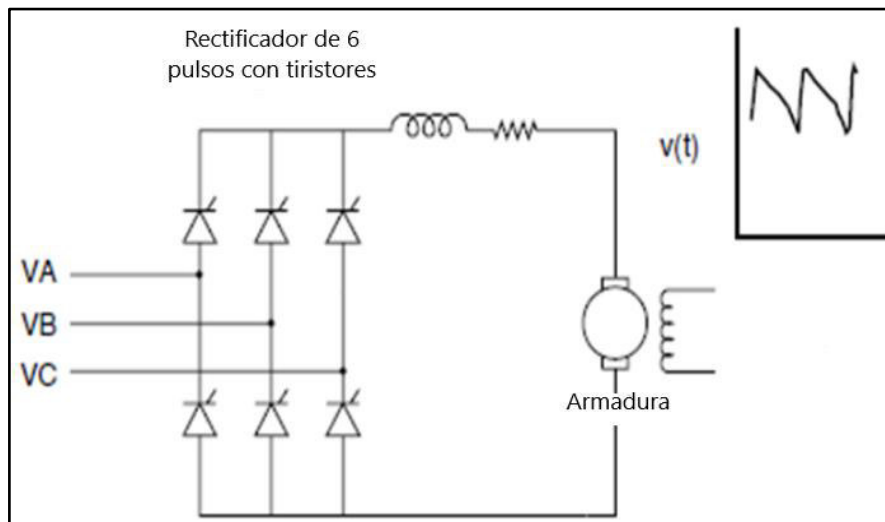


Figura 1.6. Variador de velocidad con rectificador de 6 pulsos [14]

Se caracteriza por:

- No generar armónicos triples.
- Producir armónicos del orden $6k \pm 1$.
- Tener de secuencia positiva aquellos armónicos de orden $6k + 1$, y de secuencia negativo los de orden $6k - 1$.

- Valor RMS de la frecuencia fundamental de: $I_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) I_d = (\sqrt{6}/\pi) I_d$
- El *n*-ésimo armónico tiene un valor de: $I_n = I_n/n$.

1.4.4.5.2 Rectificador de 12 pulsos

Este convertor se forma con la conexión de dos convertidores de seis pulsos, los cuales se alimentan con dos transformadores trifásicos conectados en paralelo, como se ilustra a continuación en la Figura 1.8.

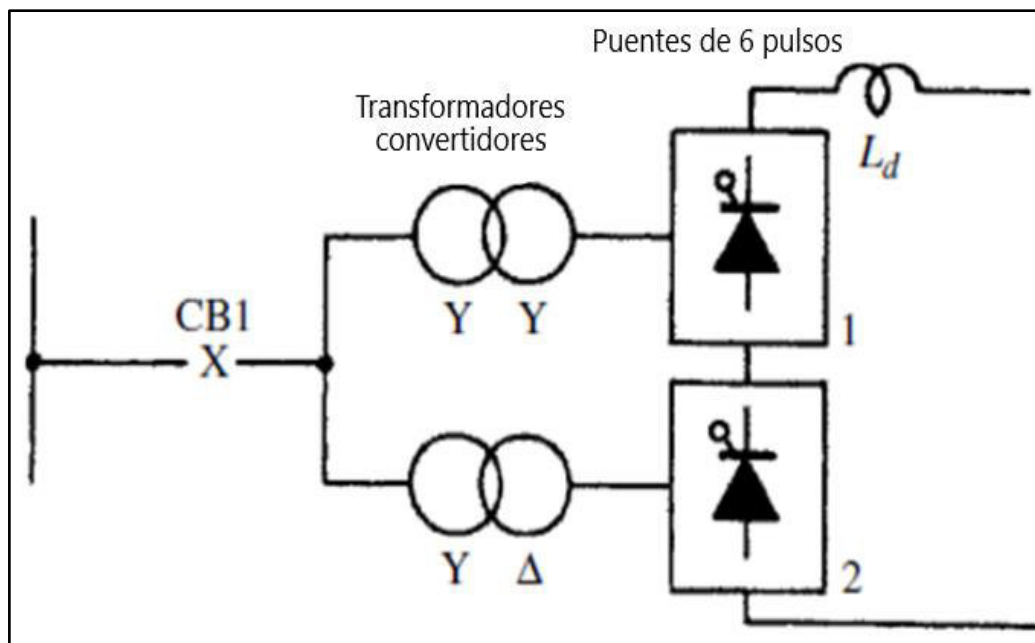


Figura 1.7. Configuración del rectificador de 12 pulsos [16]

Este convertor genera únicamente armónicos de orden $12k \pm 1$.

Existen también convertidores de 24 y 48 pulsos, sin embargo, son muy inusuales debido a su poca aplicabilidad [12].

1.4.4.6 Luminarias LED

La iluminación LED (light-emitting diode), como su nombre lo indica, tiene el principio de funcionamiento del diodo semiconductor, el cual permite la circulación de corriente eléctrica en una única dirección a través de él.

El gran incremento que han tenido las luminarias LED en los sistemas de iluminación actuales ha generado inconvenientes en la calidad del producto técnico, tales como el flickering e inyección armónica. La distorsión armónica generada por la iluminación LED es mayor que la producida por la iluminación convencional, y esta distorsión se agrava aún

más cuando se añade un sistema de dimerización a la iluminación LED, ya que estos están contruidos con componentes no lineales tales como diodos y transistores [7].

Los principales métodos de dimerización de lámparas LED se detalla en la sección A

1.4.4.7 Otras cargas no lineales residenciales

Actualmente existe una gran cantidad de cargas no lineales residenciales, entre las cuales se destacan las fuentes de alimentación conmutadas, necesarias para energizar equipos como computadores, monitores, impresoras, entre otros. De igual manera casi todos los dispositivos domóticos usados para ahorro energético y confort del usuario operan como cargas no lineales [15].

1.4.5. ILUMINACIÓN

El concepto de iluminación se refiere al aprovechamiento y utilización de la luz con fines específicos, entre los cuales podemos mencionar requerimientos estéticos de infraestructuras arquitectónicas, así como también percepción y distinción de objetos en interiores y exteriores. La luz es una radiación electromagnética que sea ha convertido en una necesidad imprescindible para la humanidad.

A continuación, se muestra las formas en que puede producirse la iluminación.

1.4.5.1 Iluminación natural

La iluminación natural se consigue mediante el aprovechamiento de la radiación electromagnética generada por el sol, específicamente el espectro de dicha radiación que es visible para el ojo humano, este aprovechamiento se logra por medio de edificaciones con infraestructuras ecoeficientes que capten la luz del sol para su óptima utilización [17].

Cabe recordar que el espectro de radiación electromagnética que es visible para el ojo humano se presenta para longitudes de onda que se encuentran en el rango de 400nm a 700nm, dicho espectro se exhibe en la Figura 1.9. También es importante considerar una característica muy importante de la luz natural, su alta variabilidad, debido a que su magnitud, espectro y distribución son afectados considerablemente por factores climáticos y geográficos [18].

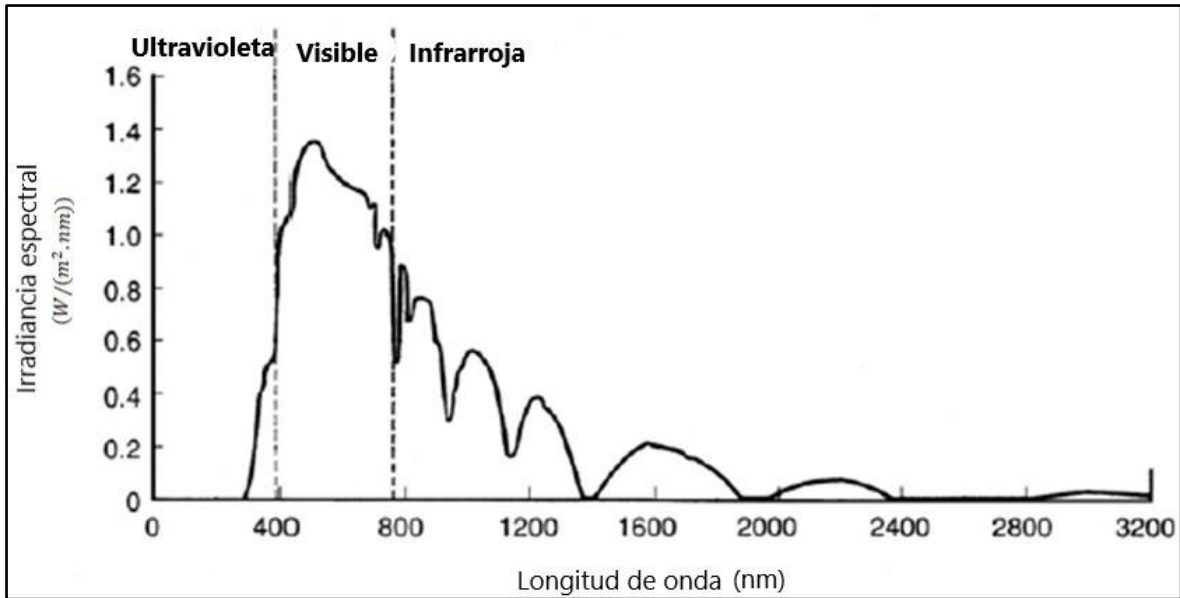


Figura 1.8. Espectro de irradiancia de la luz de día en las regiones ultravioleta, visible e infrarroja del espectro electromagnético [18]

1.4.5.2 Iluminación artificial

La iluminación artificial es aquella que se obtiene por medio de la intervención del ser humano, el descubrimiento del fuego permitió obtener la primera forma de iluminación artificial, ya que con la utilización de fogatas y antorchas fue posible iluminar zonas por varios milenios [19].

El gran avance en la iluminación artificial surgió con el descubrimiento de la electricidad, la cual vino acompañada de la invención de la bombilla incandescente, el cual basa su funcionamiento en el calentamiento de un filamento metálico mediante la circulación de corriente eléctrica, con el incremento de su temperatura el filamento emite luz en el espectro visible del ojo humano [20].

A partir de la bombilla incandescente, a lo largo del tiempo se ha venido analizando e implementando nuevas tecnologías correspondientes a lámparas eléctricas, buscando mejorar características tales como vida útil, eficiencia energética y capacidad lumínica. Entre las distintas tecnologías que han sido desarrolladas podemos mencionar las lámparas halógenas de alta y baja presión, lámparas con haluros metálicos, lámparas de inducción, lámparas fluorescentes compactas y LEDS.

La tecnología que presenta mayores prestaciones en la actualidad, y tiene un futuro más prometedor es la LED, por lo cual la siguiente sección está destinada exclusivamente para esta tecnología.

1.4.5.3 Lámparas LED

La lámpara LED (LED por las siglas en inglés de light emitting diode) es aquella que utiliza diodos emisores de luz para la producción de energía lumínica.

Su funcionamiento se basa en el diodo emisor de luz, mismo que está formado por un material semiconductor, el cual emite luz cuando existe una corriente circulando a través de este, dicho efecto es conocido como electroluminiscencia. El material utilizado para construir el semiconductor influye en el espectro electromagnético emitido por el LED. Las combinaciones de materiales más utilizadas para formar LED destinados a iluminación son: Aluminio Indio Galio Fósforo (AlInGaP) y el Nitruro de Galio-Indio (InGaN) [18].

La temperatura del material semiconductor, y la corriente circulante a través de este es la que determina la cantidad de luz que emite el LED, teniendo una emisión de luz máxima cuando se tiene una temperatura mínima y una corriente máxima. Sin embargo, es necesario evitar que la corriente sobrepase los límites establecidos por el fabricante, para mantener un adecuado funcionamiento del dispositivo y para preservar su vida útil [18].

En sus inicios los LED emitían únicamente luz en la región infrarroja, pero con el avance tecnológico de los últimos años ahora se logran emisiones de luz en las regiones ultravioleta, visible e infrarroja del espectro electromagnético. De igual manera este avance tecnológico ha permitido un crecimiento exponencial en la luz emitida y en su eficiencia, esto ha permitido que las lámparas LED pasen de ser utilizadas solo como luces de señalización, a emplearse en una gran variedad de aplicaciones de iluminación residencial, comercial e industrial [19].

En la Tabla 1.2 se presenta una comparación entre las características más importantes de las luminarias Incandescentes, Fluorescentes y LED. Se puede apreciar claramente la superioridad de la luminaria LED en comparación con el resto.

Tabla 1.1. Comparación de las características relevantes de luminarias Incandescentes, Fluorescentes y LED [19]

Características	Incandescente	Fluorescente	LED
Durabilidad	Frágil	Frágil	Durable
Encendido Instantáneo	Si	Ligero retardo	SI
Efecto del encendido y apagado cíclico	Efecto medio	Reduce su vida útil	Ningún efecto
Emisión de Calor	Alto	Medio	Bajo
Frecuencia de reemplazo (más de 50,000 horas)	4	5	1
Materiales contaminantes utilizados	Ninguno	5mg de mercurio/bombilla	Ninguno

Además de su alta eficiencia y mayor vida útil, los LED tienen las siguientes ventajas:

- Control de Color: La tecnología LED permite un control absoluto del color en todo el espectro de la luz visible
- Dimerización: Esta tecnología es inherentemente dimerizable, y pueden incluirse fácilmente con sistemas de control y sensores para conseguir un ahorro energético considerable.

1.4.5.4 Principio de Funcionamiento de Lámparas LED

Como se mencionó anteriormente su principio de funcionamiento se basa en la operación de los diodos emisores de luz, la cual se describe a continuación.

Los diodos se encuentran formados por dos materiales semiconductores, uno tipo n y otro tipo p, el material tipo n es aquel que ha sido dopado con un exceso de electrones, mientras que el tipo p se dopa con un déficit de electrones, lo que ocasiona vacíos que se denominan “huecos”, al juntar estos dos materiales se forma la región de agotamiento, en esta región se combinan los electrones y huecos en exceso que se encuentran en la unión de estos materiales, como se puede observar en la Figura 1.10 [21].

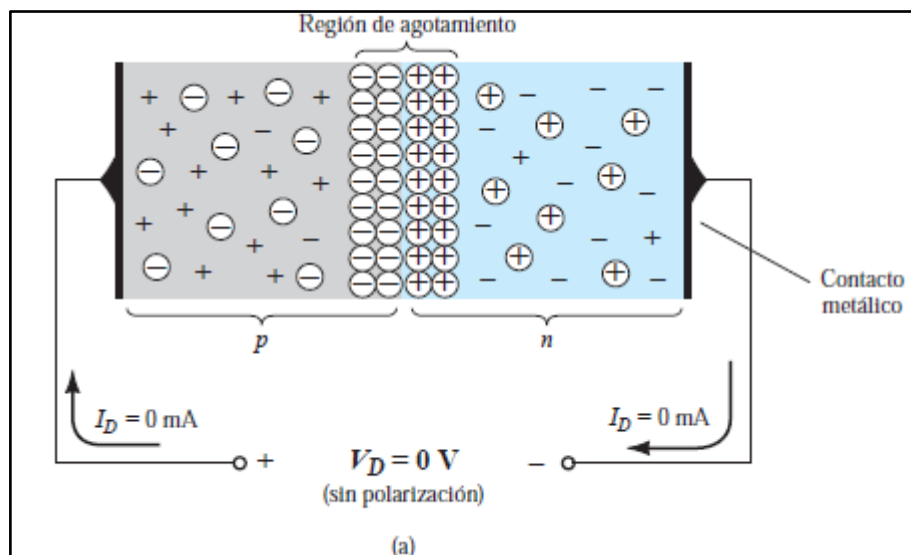


Figura 1.9. Distribución de carga interna de un diodo semiconductor [21]

Se puede notar que, ante la ausencia de una fuente de voltaje, los electrones se encuentran en equilibrio, sin embargo, al ser polarizada directamente se presenta una recombinación de electrones y huecos, la energía que poseen los electrones que se recombinan es transformada, ya sea en energía calórica o lumínica. Los diodos construidos con materiales

semiconductores como Silicio y Germanio transforman esta energía en calor, mientras que aquellos diodos formados por materiales semiconductores tales como: AlInGaP, GaN, GaP, GaAsP, GaN, transforman la energía de los electrones en luz, con longitudes de onda que abarcan las regiones infrarroja, visible y ultravioleta del espectro electromagnético.

En la Figura 1.11 se muestra el proceso de electroluminiscencia de LED al ser polarizado directamente.

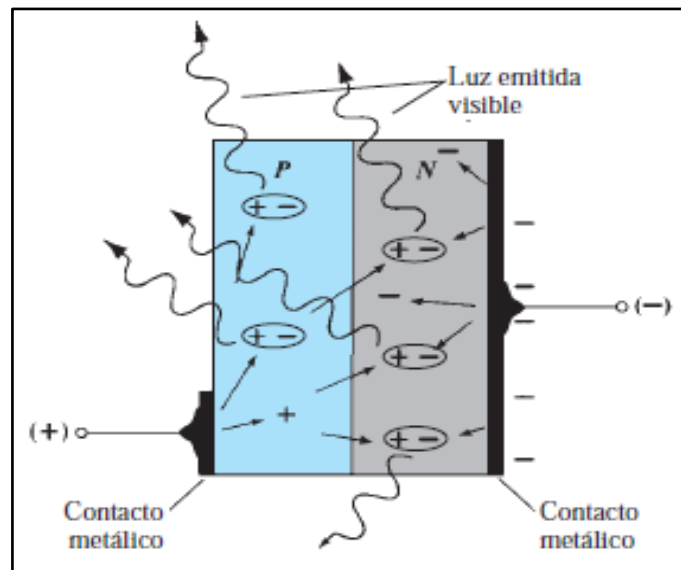


Figura 1.10. Proceso de electroluminiscencia en el LED [21]

Como se puede observar, el material metálico conectado al material tipo p es mucho más pequeño que el conectado al material tipo n, esto se hace con la finalidad de obtener una emisión de energía lumínica máxima.

1.4.5.5 Dimerización de LED

La capacidad de dimerización de lámparas LED es muy beneficioso, debido a que permite incrementar el ahorro energético de este tipo de lámparas, así como también posibilita la generación de luz en varios colores. Existen dos formas de realizar el proceso de dimerización, las cuales se detallan a continuación.

1.4.5.5.1 Dimerización por modulación de amplitud (MA)

Consiste en el empleo de fuentes de potencia lineales o circuitos de control de la corriente de retroalimentación de convertidores de potencia, para modular la magnitud de la corriente DC de polarización del LED. La eficacia lumínica lograda con este método de modulación es mucho mejor que la que se logra con otras formas de modulación, sin embargo, no es recomendable emplearlo en situaciones en las que se requiere una buena reproducción cromática y un excelente control de la luminosidad [20].

1.4.5.5.2 Dimerización por modulación de ancho de pulso (PWM)

Este método consiste en realizar la modulación de ancho de pulso, conocida como PWM, la cual permite controlar el nivel de iluminación de las luminarias, mediante la variación del ciclo de trabajo, lo cual se puede lograr con una serie de circuitos, los cuales se ilustran a continuación en la Figura 1.12.

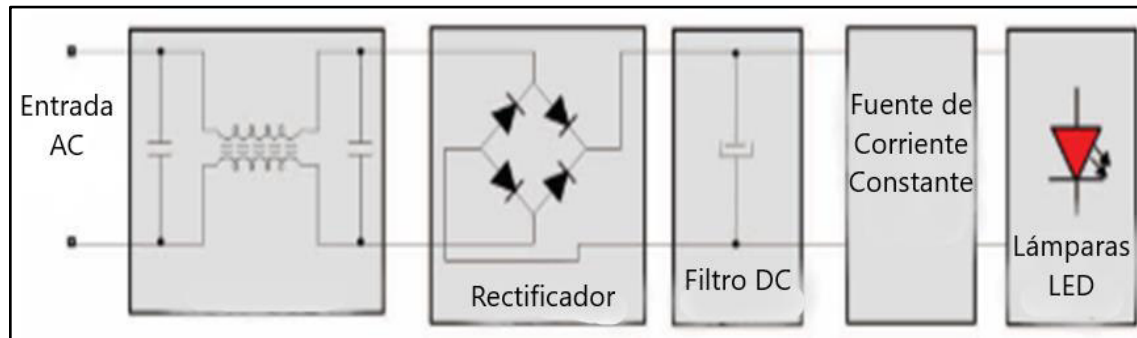


Figura 1.11. Diagrama de bloques de la fuente de alimentación para lámparas LED [6]

En la Figura 1.12 se puede observar los siguientes componentes:

- Un filtro EMI, el cual se coloca para evitar la interferencia electromagnética que se genera por la conmutación del circuito.
- Un puente rectificador con un capacitor suavizado para transformar la señal de entrada AC en una señal de DC.
- Un convertidor DC-DC para obtener un valor constante de corriente.

Todos estos elementos en conjunto se convierten en una fuente de distorsión armónica que es necesaria analizar y caracterizar.

Este método también presenta problemas con la reproducción cromática, sin embargo, su corrección es más sencilla que en el caso de la modulación de amplitud (MA), por consiguiente, la modulación por ancho de pulso (PWM) es frecuentemente más utilizada para aplicaciones de dimerización [20].

1.4.5.6 Normativa para luminarias LED

Entre las normativas más importantes que deben analizarse en el estudio de luminarias LED están la ENERGY STAR Program Requirements for Solid State Lighting Luminaries y la IEC 61000-3-2 Compatibilidad Electromagnética. Los estándares antes mencionados establecen lineamientos importantes para la correcta utilización de luminarias LED.

La ENERGY STAR Program Requirements for Solid State Lighting se centra básicamente en las propiedades lumínicas de las luminarias, tales como la uniformidad del color, el mantenimiento del color, temperatura del color, eficacia lumínica, garantía entre otros. El estándar establece que el factor de potencia en instalaciones residenciales debe ser mayor o igual a 0.7, mientras que para aplicaciones industriales debe ser mayor o igual a 0.9. De igual manera dispone que la frecuencia de operación de la luminaria debe ser mayor o igual a 120Hz, esto con la finalidad de evitar que se produzca el efecto de flickering, el cual se traduce en un parpadeo visible de la luminaria que provoca incomodidad e incluso puede causar un impacto nocivo en la salud visual de las personas [22].

Mientras que la IEC 61000-3-2 establece límites de emisión armónica por parte de equipos eléctricos y electrónicos hacia la red. El estándar realiza una clasificación de los equipos de iluminación en base a la potencia que consume, siendo Clase C los equipos con una potencia mayor o igual a 25W, mientras que aquellos que consumen menos de 25W son Clase D.[23] En la Tabla 1.3 se presentan los límites de emisión armónica para cada clase.

Tabla 1.2. Límites de corriente para equipos de iluminación con Clase C ($\geq 25W$) y Clase D ($< 25W$) [20]

Orden Armónico n	Corriente armónica máxima permitida (%) para Clase C	Orden Armónico n	Corriente armónica máxima permitida (mA/W) para Clase D
2	2		
3	30*fp	3	3.2
5	10	5	1.9
7	7	7	1.0
9	5	9	0.5
11 ≤ n ≤ 39	3	11	0.35
Sólo impar		13 ≤ n ≤ 39 Sólo impar	3.85/n

1.4.6. MODELOS DE FUENTES DE CORRIENTE DE LUMINARIAS LED DIMERIZABLES

1.4.6.1 Introducción

Luego de realizar las mediciones necesarias para caracterizar el contenido armónico de las luminarias LED con dimerización utilizando el analizador de armónicos, es recomendable modelar cada una de estas luminarias para obtener un circuito equivalente que facilite los análisis necesarios para determinar las mejoras que se requieren para mitigar dicho contenido armónico.

La modelación consiste en representar un fenómeno de la forma más realista posible, al ser esta representación tan solo una aproximación, no se debe afirmar que un modelo es correcto o incorrecto. Existen solamente modelos inteligentes y torpes, siendo los primeros aquellos que entregan resultados más cercanos a la realidad, mientras que los torpes dan resultados poco realistas.

1.4.6.2 Modelización como fuentes de corriente

Como ya se mencionó anteriormente la distorsión armónica es causada por cargas no lineales, de manera regular se considera que este contenido armónico generado se inyecta hacia la red eléctrica, por lo cual para su representación estas fuentes armónicas son sustituidas por fuentes de voltaje o fuentes de corriente. Sin embargo, en vista de que la distorsión armónica de voltaje de muchos dispositivos no lineales generalmente es menor al 10%, se considera despreciable, y se utiliza únicamente fuentes de corriente ideales para modelar las fuentes armónicas [14]. Los valores de corriente de dichas fuentes, así como su frecuencia se obtienen mediante las mediciones realizadas.

A continuación, en la Figura 1.13 se muestra la gráfica de una carga no lineal que inyecta armónicos a la red, como una fuente de corrientes armónicas.

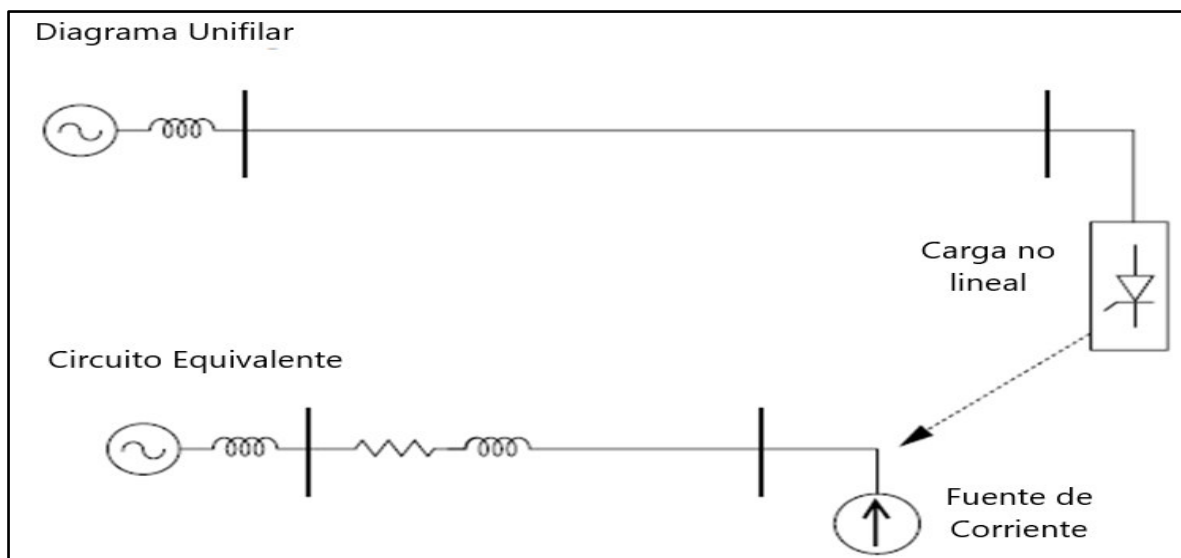


Figura 1.12. Representación de una carga no lineal como fuente de corrientes armónicas para su análisis [14]

El valor de las corrientes armónicas generadas por la carga no lineal, se obtienen mediante mediciones realizadas. Por lo general las diferentes fuentes armónicas existentes en una red producen componentes dispersas, debido a esto, para su representación es necesario utilizar varias fuentes de corriente con frecuencias que correspondan a las componentes armónicas que se busca modelar [24].

A continuación, en la Figura 1.14 se exhibe el esquema con la representación de múltiples fuentes de corrientes armónicas.

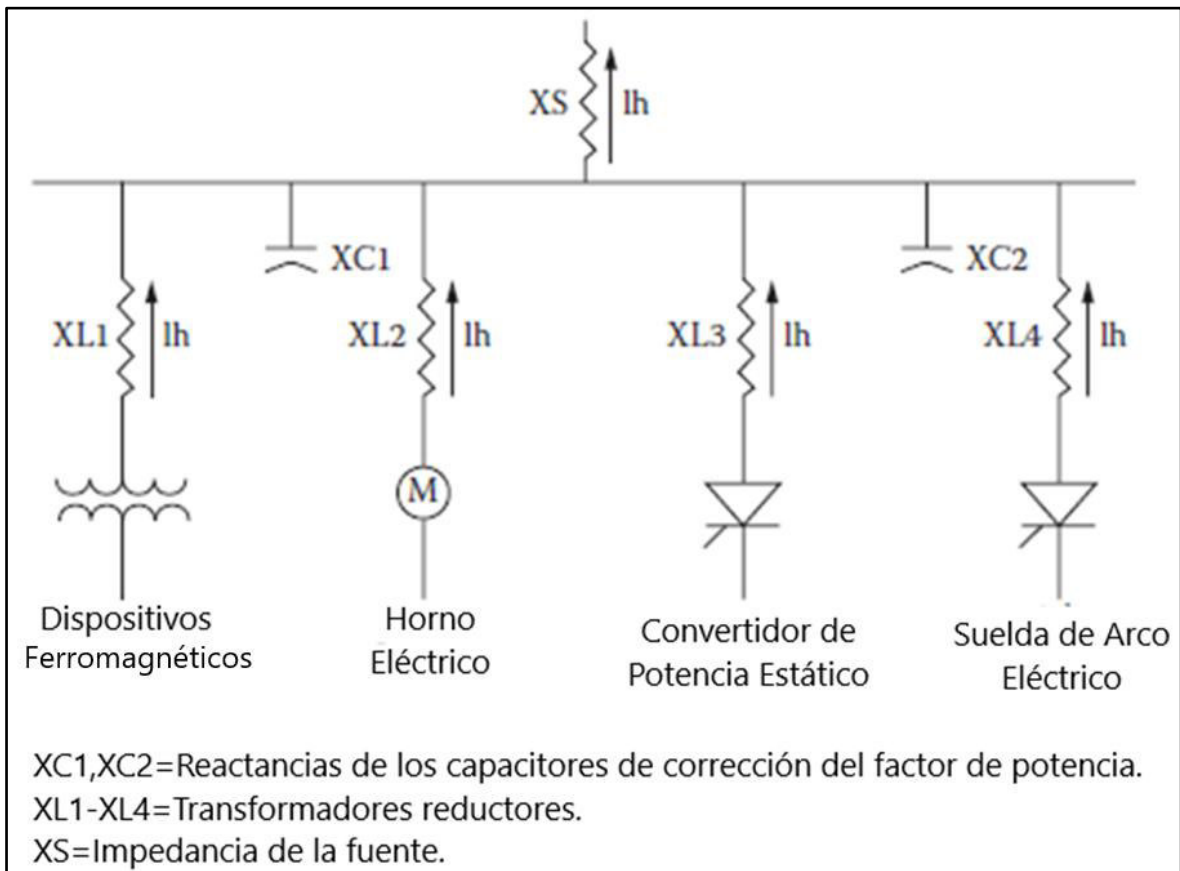


Figura 1.13. Corrientes armónicas inyectadas por diferentes cargas [24]

Las capacitancias e inductancias presentes en los dispositivos bajo análisis son necesarias de considerar debido a que su impedancia influye directamente en la propagación de las corrientes armónicas.

En ocasiones en las que no es posible realizar mediciones o no existe información proporcionada por el fabricante con lo que respecta a la distorsión armónica generada por el equipo, frecuentemente se asume que el valor del contenido armónico es inversamente proporcional al orden de dicho armónico, teniéndose que el valor del tercer armónico de corriente será igual a un tercio del valor de la fundamental, y así sucesivamente para el resto de las componentes. Sin embargo, esta asunción ha perdido cierto grado de aplicabilidad con los modernos dispositivos tecnológicos utilizados en la actualidad, tales como fuentes de alimentación conmutada y controladores PWM, debido a que generan una distorsión armónica mucho mayor [14].

1.4.6.3 Modelización de luminarias LED dimerizables

El circuito equivalente utilizado para modelar las luminarias LED con dimerización se muestra a continuación en la Figura 1.15.

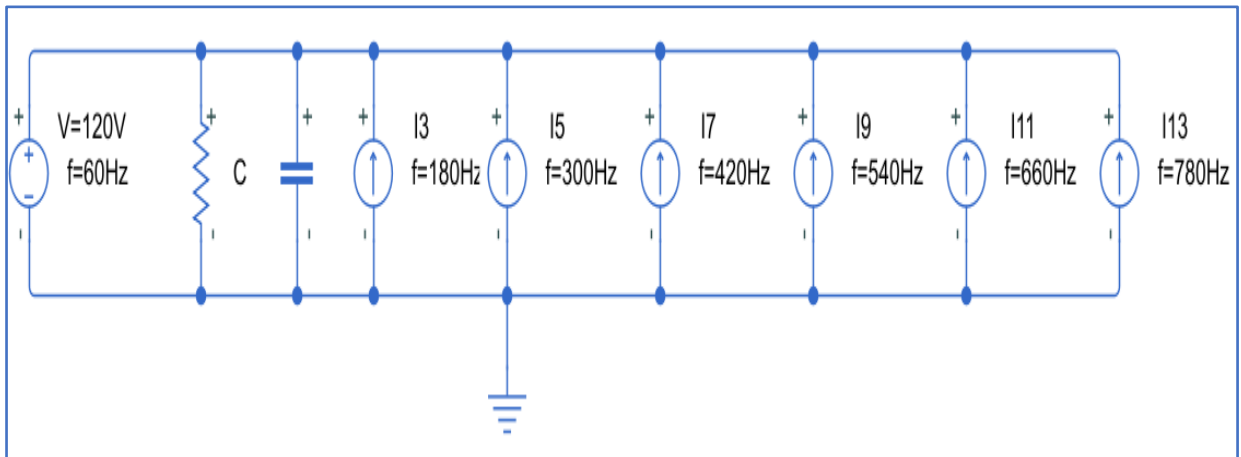


Figura 1.14. Modelo de fuentes de corriente de las luminarias LED dimerizables [Elaboración Propia]

La fuente alimentación se representa como una fuente de voltaje con una frecuencia igual a la fundamental, la cual es de 60Hz.

La resistencia se obtiene mediante la división del voltaje de alimentación entre la potencia activa consumida por la carga, como muestra la Ecuación 1.2.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1.2)$$

Donde:

R: Resistencia de la luminaria

V: Voltaje de alimentación

P: Potencia consumida por la luminaria

El valor de la capacitancia se obtiene mediante la división de la potencia reactiva, como se muestra en la Ecuación 1.3.[25]

$$C = \frac{Q}{2 * \pi * V^2} \quad (1.3)$$

Donde:

C: Capacitancia de la luminaria

Q: Potencia reactiva medida en la luminaria

V: Voltaje de alimentación

Las fuentes de corriente se dimensionan en base a los datos medidos como se mencionó anteriormente, teniéndose que cada fuente de corriente representa a una componente armónica tanto en magnitud como en frecuencia.

1.4.6.4 Herramientas computacionales

Las herramientas computacionales actuales han facilitado enormemente el análisis de la calidad del producto eléctrico, sin embargo, para ser útiles estos programas computacionales deben poseer las siguientes funcionalidades:

- Capacidad de simular una cantidad considerable de nodos eléctricos.
- Modelación de sistemas polifásicos.
- Modelación de sistemas de secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero.
- Admitir un amplio rango de frecuencia de operación.
- Poseer plantillas de modelos de fuentes de armónicas comunes.
- Permitir la modelación completa de las fuentes de armónicos, tanto como fuentes de corriente y de voltaje.
- Capacidad de ajustar los ángulos de fase de las fuentes automáticamente, basándose en los ángulos de fase de la frecuencia fundamental.
- Modelación de los diferentes tipos de conexión de transformadores.
- Poseer una interfaz amigable con el usuario que muestre adecuadamente los resultados.

1.4.7. MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

Existen varios métodos para mitigar la distorsión armónica generada, estos métodos evitan que los límites de emisión sean superados; su diseño, instalación y mantenimiento son responsabilidad del usuario final [15].

Los límites de emisión son establecidos por la norma IEEE Std 519-2014, la cual recomienda las prácticas y requerimientos para el control de armónicos en el sistema eléctrico de potencia. En la Tabla 1.4 se puede apreciar los límites de distorsión de voltaje, mientras que en la Tabla 1.5 se exponen los límites de distorsión armónica de corriente.

Tabla 1.3. Límites de distorsión de voltaje [26]

Voltaje de barra en PCC	Contenido armónico individual (%)	Distorsión armónica total (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Tabla 1.4. Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas con voltajes nominales de 120V a 69kV [26]

Distorsión armónica de corriente máxima en porcentaje de I_L						
Orden armónico individual (armónicos impares)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Existen varios métodos de mitigación de armónicos, por lo cual es necesario conocer a profundidad su funcionamiento y aplicabilidad para utilizar el método adecuado dependiendo de las características de la distorsión armónica que se tenga.

A continuación, se detallan la clasificación de los métodos de mitigación:

- Preventivos. – Son aquellos que impiden la generación de armónicos.
- Curativos. – Estos métodos permiten filtrar los armónicos existentes.
- Paliativos. – Permiten reducir los efectos causados por los armónicos, sin embargo, la presencia de armónicos continúa en el sistema.

1.4.7.1 Métodos de Mitigación

1.4.7.1.1 Transformadores en ZigZag

Este método es utilizado para mitigar corrientes armónicas de secuencia cero, debido a que presenta una baja impedancia ante corrientes de secuencia cero, y una impedancia alta para corrientes de secuencia positiva y negativa. Para obtener resultados de mitigación óptimos el transformador debe conectarse próximo a la carga [27].

A continuación, en la Figura 1.16 se ilustra la conexión de dicho transformador.

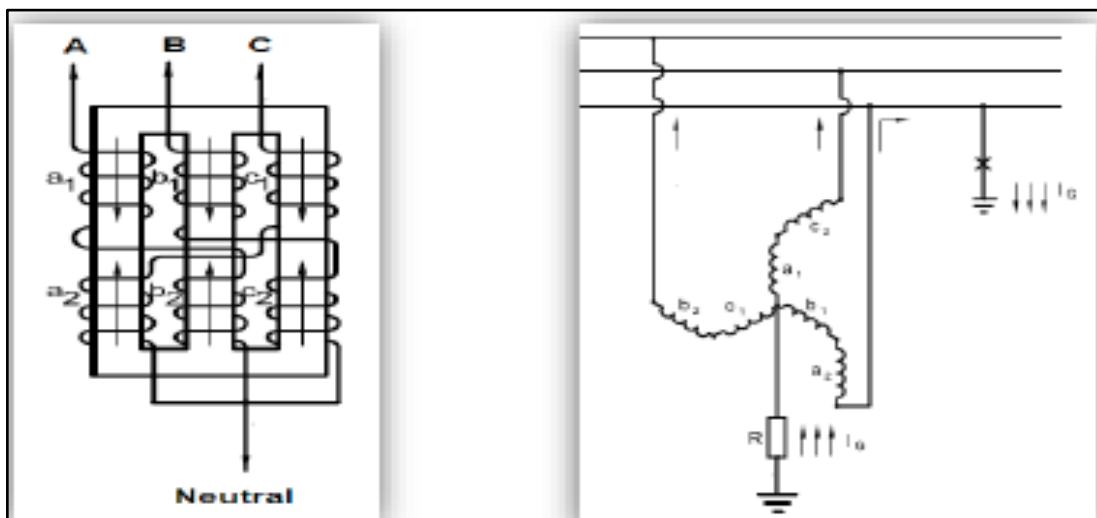


Figura 1.15. Conexión de transformador ZIG-ZAG [28]

Las corrientes armónicas de secuencia negativa generadas por la carga se derivan al transformador Zigzag, debido a que este presenta un camino de bajo impedancia para estas corrientes, convirtiéndose en una especie de trampa de armónicos evitando así que estas circulen hacia la red. Este método es de gran ayuda para evitar problemas como el calentamiento del transformador y la sobrecarga del neutro, los cuales son muy perjudiciales en una red eléctrica.

Estudios previos han demostrado que el tercer armónico es el componente armónico más grande en instalaciones residenciales que cuentan con una cantidad considerable de componentes electrónicos, tales como computadores. De igual manera se ha evidenciado que este método permite reducir en un 50% aproximadamente el tercer armónico de corriente, permitiendo así que no se superen los límites establecidos [14].

1.4.7.1.2 Uso de transformadores en conexión Delta-Y

Este método consiste en utilizar un transformador con conexión Delta-Y, debido a que con esta conexión se logra un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas triples,

las cuales ingresan al bobinado Delta del transformador y quedan encerradas, impidiendo que fluyan hacia la línea. En la Figura 1.17 se presenta la conexión Delta-Triángulo de un transformador trifásico.

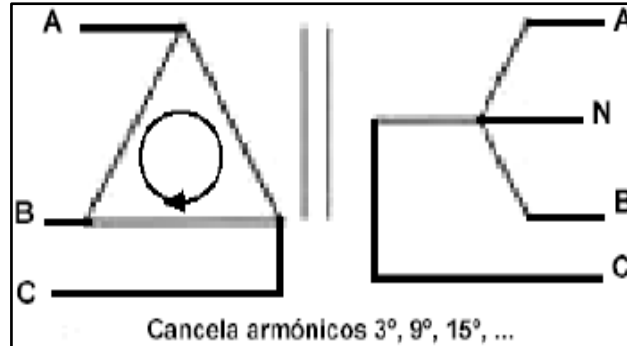


Figura 1.16. Conexión Delta-Triángulo de un transformador trifásico [29]

La mitigación de los armónicos triples tiene una gran importancia, debido a que, en sistemas trifásicos balanceados, los armónicos triples del mismo orden están en fase todo el tiempo, lo cual implica que la corriente que circula por el neutro se triplicará, debido a que la corriente del neutro será igual a la suma aritmética de las corrientes de fase, para entender este fenómeno se ilustra de la siguiente manera.

$$i_{a(3n)} = I \text{sen}(3\omega t) \quad (1.4)$$

$$i_{a(3n)} = I \text{sen}\left(3\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.5)$$

$$i_{a(3n)} = I \text{sen}\left(3\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.6)$$

Donde $n=1,2,3$, etc.

$$i_{a(3n)} = i_{b(3n)} = i_{c(3n)} \quad (1.7)$$

Como se puede observar las componentes armónicas triples se encuentran en fase, lo que implica que se suman aritméticamente, con lo cual la corriente resultante en el neutro se triplicará [30].

La capacidad de mitigación de los armónicos triples por parte de este método es muy valiosa, por lo peligrosas que pueden llegar a ser estas componentes al encontrarse en fase. Sin embargo, este método de mitigación protege únicamente a la línea, lo cual es una

gran desventaja ya que la carga, el transformador y la acometida se verán afectados por la presencia de corrientes armónicas circulantes.

1.4.7.1.3 Transformadores con distinto grupo de conexión

Este método se utiliza en instalaciones eléctricas en las que se tiene cargas idénticas, para alimentar estas cargas idénticas se utilizan transformadores con grupos de conexión que permitan la anulación geométrica de las componentes armónicas de corriente más altas [27].

El uso de transformadores con distinto grupo de conexión es un método que protege adecuadamente a la línea, sin embargo, no salvaguarda al transformador.

A continuación, en la Figura 1.18 se muestra un esquema del funcionamiento de este método de mitigación.

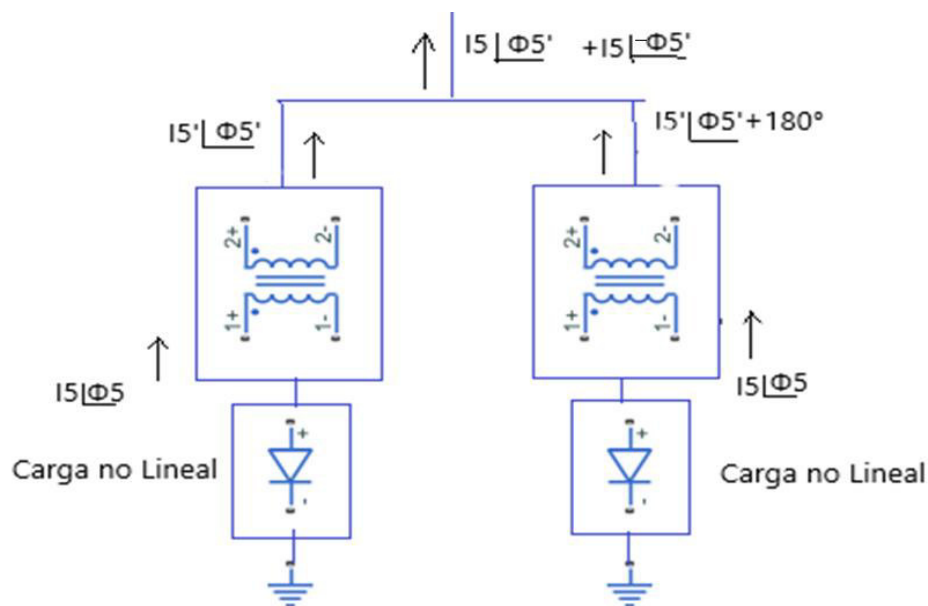


Figura 1.17. Esquema de mitigación de armónicos empleando transformadores con distinto grupo de conexión [27]

1.4.7.1.4 Inductancias de choque

El método consiste en aprovechar la propiedad intrínseca de las inductancias de oponerse al cambio de campo magnético, lo que evita que se produzcan cambios abruptos en los valores de corriente. Este método permite reducir en al menos un 50% la distorsión armónica total, dependiendo del valor de la inductancia. No obstante, su valor no debe ser demasiado grande, ya que esto se traduciría en una impedancia serie muy alta, por consiguiente, las pérdidas por efecto Joule incrementarían, obteniéndose así caídas de voltaje superiores a los límites permitidos [27].

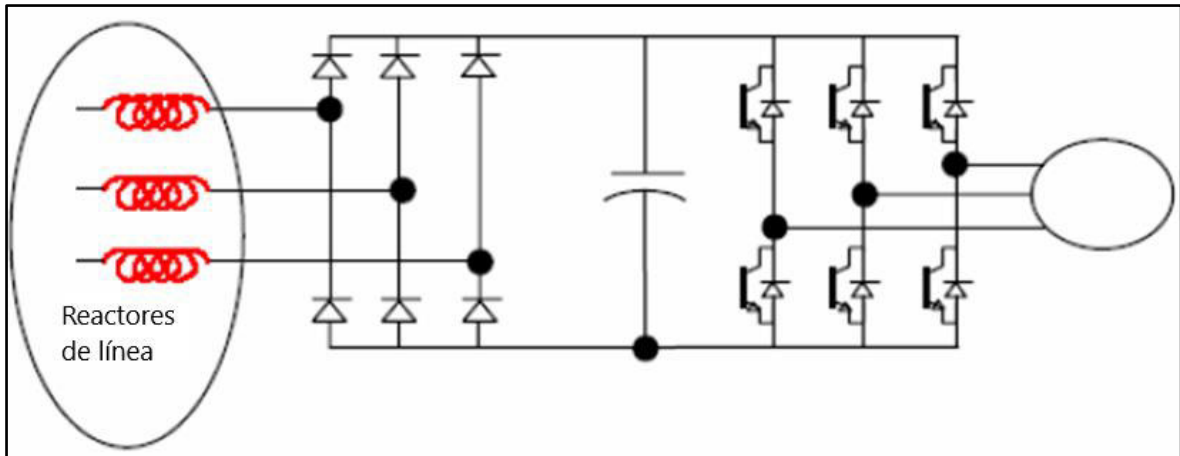


Figura 1.18. Topología de conexión de los reactores de línea [29]

En la Figura 1.19 se muestran la topología de las inductancias de choque conectadas en la línea, no obstante, también pueden conectarse directamente a la carga.

La conexión de las inductancias de choque posibilita que las corrientes de frecuencia fundamental circulen fácilmente, sin embargo, muestra valores de impedancia mayores para las corrientes armónicas, de esta manera las componentes armónicas se atenúan.

Para el dimensionamiento de estas inductancias, es necesario tomar en consideración la impedancia efectiva con la que opera, la misma que depende de la inductancia y de la corriente fundamental circulante.

Para su dimensionamiento se utiliza la Ecuación 1.8.:

$$\text{Impedancia Efectiva} = \frac{2\pi fL * I_{\text{fundamental}}}{\frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}} * 100 \quad (1.8)$$

Donde:

f: Frecuencia de operación

V_{LL} : Voltaje entre líneas

I fundamental: Magnitud de la componente fundamental de corriente

Generalmente su valor estará entre el 1-8% de la impedancia efectiva de la carga.

Si bien este método es una forma simple y económica de mitigar los armónicos, no logra reducir el contenido armónico por debajo de los límites establecidos, por lo cual debe ir acompañado de otros métodos de mitigación más sofisticados.

1.4.7.1.5 Aumento del calibre del conductor

Como ya se mencionó anteriormente, los armónicos triples de secuencia cero se encuentran en fase, por lo cual la corriente del neutro será el resultado de su suma aritmética, provocando así una corriente armónica muy alta circulando por el neutro, lo cual causaría graves problemas, como el sobrecalentamiento del neutro.

Un método que suele utilizarse para evitar que el neutro de una instalación eléctrica sea afectado por este alto contenido armónico es aumentar el calibre del neutro, con la cual se evita que se sobrecaliente, sin embargo, al hacer esto no se soluciona el problema del alto contenido armónico, ya que los demás equipos de la instalación como el transformador seguirán teniendo problemas significativos. Debido a esto, este método debería utilizarse únicamente como una solución temporal, hasta que pueda realizarse el diseño e instalación de un método que en verdad pueda mitigar el contenido armónico, para que así se proteja a todos los componentes de la instalación eléctrica, y no solo al neutro.

1.4.7.1.6 Uso de transformadores factor K

Los transformadores factor K son aquellos que han sido diseñados y construidos especialmente para ambientes que se encuentran contaminados con un alto contenido armónico. Están construidos con materiales de mejor calidad, lo cual le permite soportar altas corrientes armónicas sin sobrecalentarse.

Para lograr esto, estos transformadores son construidos con ciertos componentes tales como, con una pantalla electrostática entre bobinados, cableado más robusto, bobinados sobredimensionados y mejor aislados, entre otros.

El factor K se obtiene con la Ecuación 1.9.

$$Factor\ K = \sum_{h=1}^h I_h^2 h^2 \quad (1.9)$$

Donde:

h= orden armónico.

I_h=valor de la corriente armónica (expresado en pu).

En la Tabla 1.6 se muestra la clasificación de los valores estandarizados del Factor K y las cargas típicas.

Tabla 1.5. Clasificación del Factor K de transformadores [31]

Carga	Factor K
Iluminación incandescente (sin controladores de estado sólido)	K-1
Calentador de resistencia eléctrica (sin controladores de estado sólido)	K-1
Motores (sin controladores de estado sólido)	K-1
Dispositivos de control de transformadores, motores y generador	K-1
Motores-Generadores (sin controladores de estado sólido)	K-1
Iluminación de descarga eléctrica	K-4
UPS con filtro de entrada	K-4
Equipo de calentamiento por inducción	K-4
Suelda eléctrica	K-4
PLC's y controladores de estado sólido (que no sean variadores de velocidad)	K-4
Equipos de telecomunicaciones	K-13
UPS sin filtro de entrada	K-13
Circuitos de receptáculo de cables múltiples en áreas de salud de cuidado general, instalaciones y aulas de escuelas, etc.	K-13
Circuitos de receptáculo de cables múltiples que suministran inspecciones o equipos de pruebas en un montaje o línea de producción	K-13
Cargas de computadores centrales	K-20
Controladores de estado sólido de motores (variadores de velocidad)	K-20
Circuitos de receptáculo de cables múltiples en áreas de cuidados críticos y salas de operación y recuperación en hospitales	K-20
Circuitos de receptáculo de cables múltiples en laboratorios industriales, médicos y educacionales	K-30
Circuitos de receptáculo de cables múltiples en espacios de oficina comerciales.	K-30
Pequeños computadores centrales (mini y micro)	K-30
Otras cargas que han sido identificadas como generadoras de cantidades muy altas de armónicos (especialmente de orden alto)	K-40

1.4.7.1.7 Desclasificación de Transformadores

Las corrientes armónicas inyectadas a los sistemas eléctricos producen efectos muy perjudiciales en los transformadores de distribución, tales como pérdidas por efecto Joule muy altas, sobrecalentamiento y resonancia, en caso de existir capacitores conectados. Para poder mitigar esto se realiza la desclasificación de transformadores, la cual consiste en sobredimensionar al transformador para volverlo más robusto, o mermar la carga conectada a este para que opere por debajo de su potencia nominal.

Para desclasificar un transformador de manera adecuada es necesario calcular el factor K del transformador, su cálculo esta detallado la normativa IEEE Std C57.110 2018 con la Ecuación 1.10.

$$\text{Factor } K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2(\text{pu}) * h^2 \quad (1.10)$$

Donde:

I_h : valor rms de la corriente de la componente armónica h (valor rms de la corriente de carga en pu)

h: el orden de la componente armónica

El objetivo de utilizar el factor K es determinar la capacidad del transformador para trabajar con cargas no lineales que provocan distorsiones armónicas, debido a que permite obtener el límite de carga del transformador para que opere en condiciones seguras, con el fin de preservar su vida útil. En la Tabla 1.7 se expone la comparación entre el Factor K y el Factor de pérdidas armónicas.

Tabla 1.6. Comparación del Factor K y el factor de pérdidas armónicas para diferentes cargas [32]

kVA	Corriente Nominal (I_R) (A)	K-factor	Factor de pérdidas armónicas (F_m)
1500	1804	2.73	2.73
2000	2406	1.53	2.73
2500	3007	0.982	2.73

1.4.7.1.8 Aumento del número de pulsos en convertidores

Anteriormente se explicó a detalle los armónicos generados por los convertidores de 6 y 12 pulsos, mostrando que el convertidor de 6 pulsos produce armónicos del orden $6k \pm 1$ mientras que en el convertidor de 12 pulsos se tienen armónicos del orden $12k \pm 1$, y en efecto para un convertidor de n pulsos, los armónicos generados serán de orden $nk \pm 1$.

Como podemos notar al incrementar el número de pulsos del convertidor, se reduce la cantidad de armónicos característicos generados. Generalmente el convertidor más utilizado con este fin es el convertidor de 12 pulsos, ya que, si bien es cierto que el convertidor de 18 pulsos produce menos armónicos, es muy costoso.

Sin embargo, para que sea posible mitigar los armónicos utilizando estos convertidores el sistema debe cumplir con ciertos requerimientos tales como:

- Los transformadores deben tener impedancias de fuga semejantes y la misma relación de transformación.
- Distribución de carga uniforme en los convertidores.
- Mismo ángulo de disparo.
- Diferencia de fase $60/N$ grados eléctricos entre los transformadores [24].

1.4.7.1.9 Filtros

1.4.7.1.9.1 Filtros Pasivos

Los filtros pasivos son aquellos que están contruidos con elementos pasivos tales como resistores, inductores y capacitores. Son los más usados para la mitigación de distorsiones armónicas en la actualidad, debido a su módico costo en comparación con otros equipos utilizados para el mismo propósito. Funcionan a través de resonancias serie o paralelo para la formación de impedancias cero o infinitas, la impedancia cero es un camino que va a atraer a las corrientes armónicas, mientras que la impedancia infinita no va a permitir el paso de dichas corrientes. En la Figura 1.20 se ilustra el esquema de conexión de un filtro pasivo en una red con contaminación armónica, se puede observar como el filtro atrae a la corriente armónica generada por la fuente de armónicos, evitando así que dicha corriente ingrese a la red.

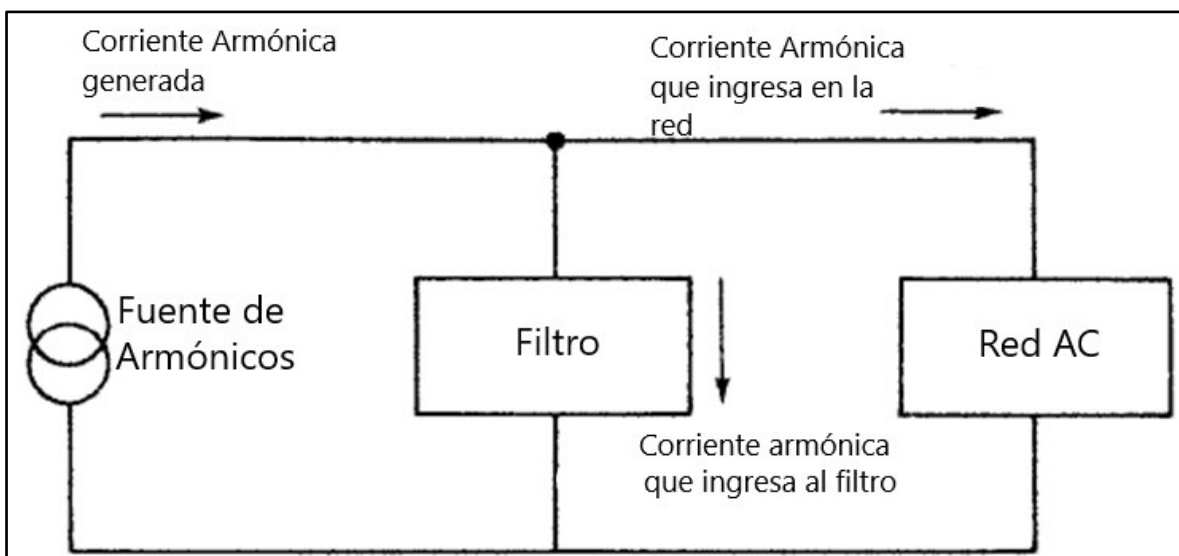


Figura 1.19. Esquema de conexión de un filtro pasivo en una red con contaminación armónica [16]

Sin embargo, a pesar de ser económicos y soportar altas potencias, tienden a interactuar de forma negativa con la red, y podrían llegar a desintonizarse fácilmente y no mitigar el armónico para el cual fueron diseñados. Debido a esto, es necesario realizar un estudio

profundo de todas las probables interacciones que tendría el filtro con la red eléctrica en la etapa de diseño mediante simulaciones que permitan observar su comportamiento ante variaciones de carga y cambios en la topología [14].

1.4.7.1.9.1.1 Filtros Pasivos Shunt

Es un filtro pasivo que se sintoniza para una única frecuencia, generalmente es el más utilizado para filtrar distorsiones armónicas debido a su simplicidad de construcción, confiabilidad y módico costo; este filtro se diseña para presentar una baja impedancia la cual atrae a todas las corrientes de frecuencia igual a la sintonizada en el filtro; se conectan en paralelo a la red eléctrica, con la cual las corrientes armónicas son atraídas al filtro y se derivan a tierra, evitando así que las corrientes armónicas circulen hacia la red eléctrica. La Figura 1.21 muestra las configuraciones más comunes empleadas en filtros pasivos.

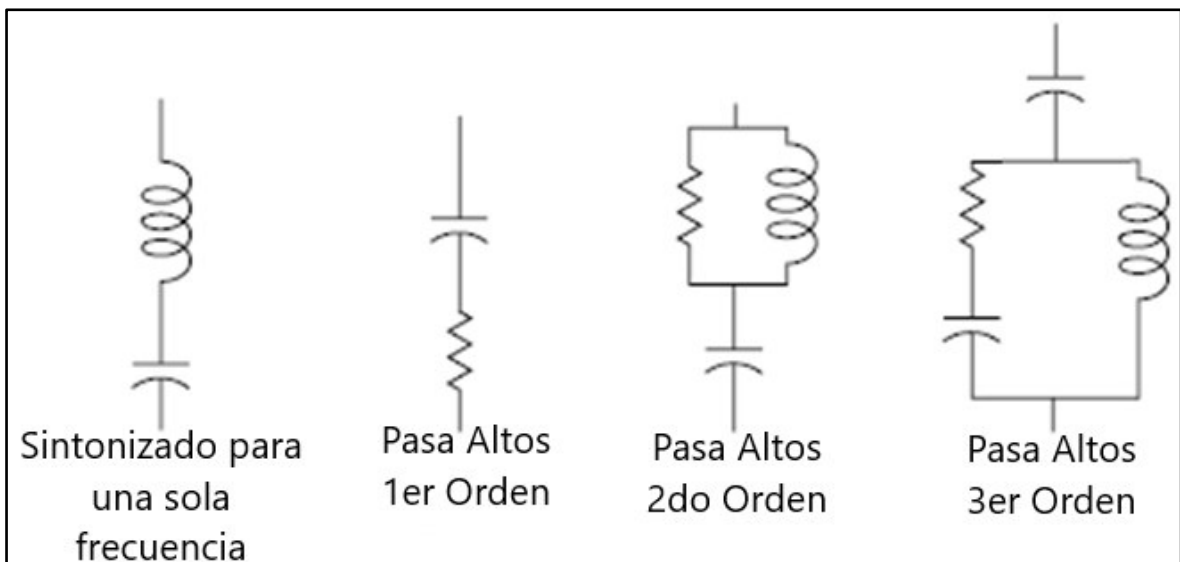


Figura 1.20. Configuraciones comunes de filtros pasivos [14]

Una desventaja que se le atribuye a este tipo de filtros es que atrae a absolutamente todas las corrientes armónicas de la red que tengan la misma frecuencia con la que fue sintonizado el filtro, lo cual ocasionaría una rápida sobrecarga de este. Debido a esto, en la etapa de diseño es necesario realizar un profundo estudio de la red eléctrica y de la carga generadora de armónicos, así como también se necesita considerar posibles reconfiguraciones de la red, e incrementos de cargas generadores de armónicas.

Además de mitigar las componentes armónicas de la red, estos filtros ayudan a mejorar el factor de potencia de esta, debido a la compensación reactiva entregada por la capacitancia del filtro. Cuando se conectan varios filtros en paralelo para mitigar múltiples

componentes armónicas, es necesario considerar la compensación reactiva entregada por cada uno de estos.

La frecuencia de resonancia del filtro se expresa mediante la Ecuación 1.11.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.11)$$

Donde:

f_0 : Frecuencia de resonancia en hercios.

L: Inductancia del filtro en henrios.

C: Capacitancia del filtro en faradios.

1.4.7.1.9.1.2 Filtro Pasivo Serie

Estos filtros se construyen con componentes pasivos tales como inductores y capacitores, su función principal es filtrar el armónico de frecuencia de sintonización, al igual que el filtro pasivo shunt. Sin embargo, su diferencia radica en que debe conectarse en serie con la carga. El filtro pasivo serie es diseñado para presentar una impedancia infinita, la cual impedirá el paso de la componente armónica sintonizada.

A continuación, en la Figura 1.22 se presenta un esquema del filtro pasivo serie, como se puede notar el capacitor y la inductancia que lo conforman deben conectarse en paralelo.

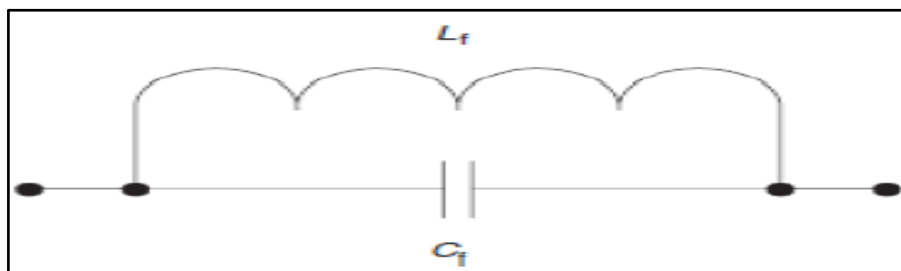


Figura 1.21. Filtro pasivo serie [14]

La utilización de este filtro presenta varias desventajas, una de ellas es que, al ser conectado en serie, debe diseñarse para soportar el valor máximo de la corriente de carga, para evitar sobrecalentamiento. Otra desventaja radica en que no pueden utilizarse para mitigar múltiples armónicos mediante el uso de varios filtros, ya que el estar conectados en serie, la conexión de varios filtros provocaría pérdidas considerables de potencia en el sistema.

1.4.7.1.9.2 Filtro Activo

Los filtros activos son equipos de electrónica de potencia novedosos y complejos utilizados en la mitigación de las distorsiones armónicas en la red eléctrica, su funcionamiento consiste en el monitoreo dinámico de la red para determinar la compensación que se necesita para reconstruir las ondas de voltaje y corriente y así lograr que sean senoidales, en caso de que se encuentren distorsionadas. Para conseguirlo se inyectan corrientes de igual valor, pero de fase opuesta a las componentes armónicas que se desea eliminar, de esta manera se evita deformaciones considerables en la forma de onda.

Estos dispositivos presentan enormes ventajas, entre las cuales podemos destacar:

- Son capaces de eliminar componentes armónicas de diferente frecuencia, así como también logran mitigar armónicos no característicos e interarmónicos.
- No interactúan con la impedancia del sistema, evitando así que se produzcan resonancias no deseadas, como podría ocurrir con los filtros pasivos.
- Permiten mitigar otros fenómenos perturbadores de la calidad del producto eléctrico, como la fluctuación de voltaje, la cual causa el efecto de flickering.
- Generalmente estos filtros son programados para mejorar el factor de potencia.
- Monitorean la red eléctrica dinámicamente con lo cual pueden mitigar cualquier componente armónica que se genere.

La desventaja que tiene este dispositivo en comparación con otros equipos utilizados para la eliminación de armónicos es su elevado costo, el cual no le ha permitido ser tan asequible como se desearía.

Con respecto a su forma de conexión con la red, se clasifican en dos tipos: Filtro Activo Serie y Filtro Activo Shunt.

A continuación, en la Figura 1.23 se exhibe el esquema de su conexión, tanto en serie, como en paralelo a la carga contaminante.

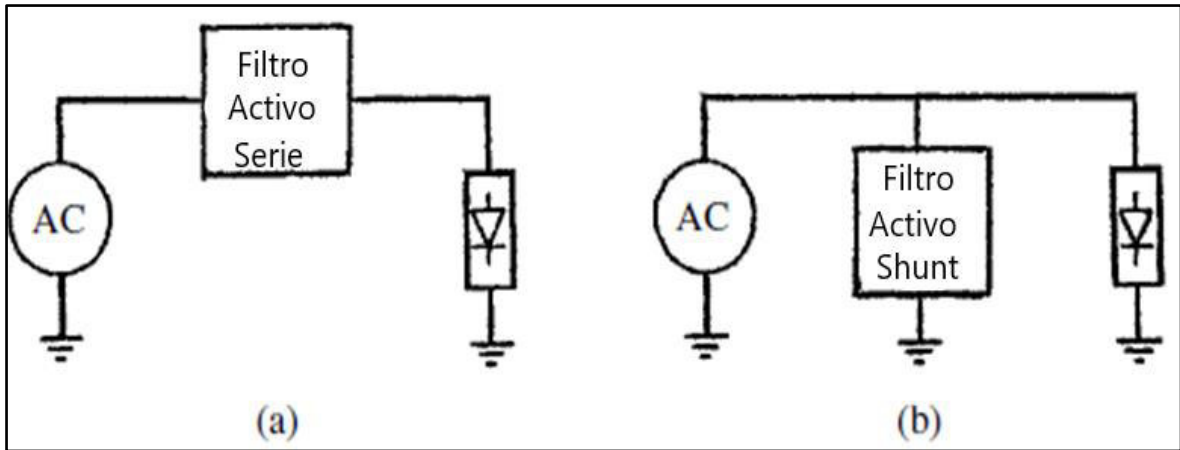


Figura 1.22. Filtros activos (a)serie; (b)shunt [16]

Ambas formas de conexión permiten mitigar la distorsión armónica de la red de manera adecuada.

En la Figura 1.24 se ilustran los componentes que conforman a un filtro activo, como se puede observar tiene mucha más complejidad que un filtro pasivo, lo cual provoca su elevado costo.

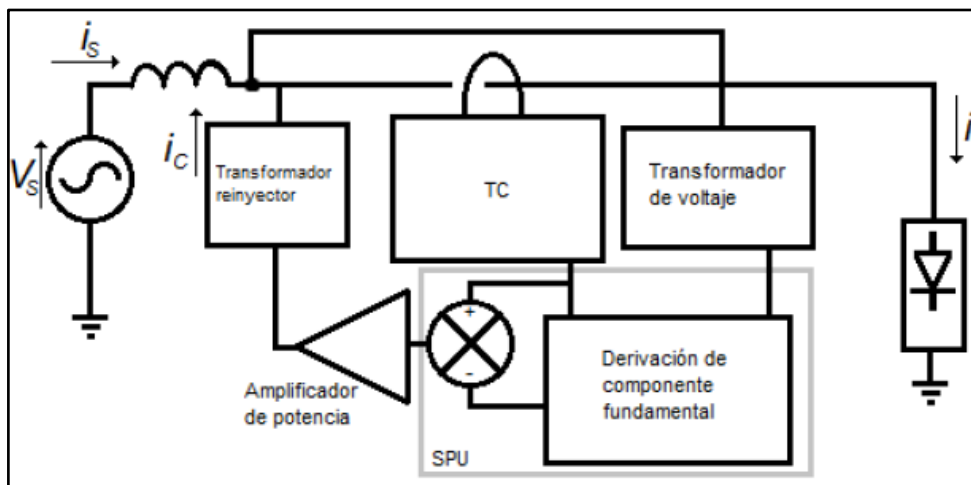


Figura 1.23. Sistema de un filtro activo para compensación de armónicos [16]

1.4.8. DIALUX EVO

DIALux Evo es un software de propósito específico que permite planificar, diseñar y simular sistemas de iluminación tanto para interiores como para exteriores. Es uno de los programas más utilizados por profesionales en proyectos de iluminación debido a que provee de varias funcionalidades que permiten simplificar de manera considerable la complejidad y duración que conlleva un diseño de este tipo. Una característica muy

importante de DIALux Evo es que permite trabajar juntamente con AutoCAD, el cual es el programa de diseño asistido por computadora más utilizado por arquitectos, ingenieros y demás profesionales involucrados en la industria de la construcción, debido a sus notables prestaciones en visualización, creación y edición de planos 2D, incluso permitiendo la modelación en 3D [33].

DIALux posibilita crear proyectos de iluminación para una gran variedad de aplicaciones, tales como edificios, habitaciones, vías, parques, etc. De igual manera permite realizar renderizaciones 3D de forma simple y sencilla, con lo cual es posible visualizar de manera más detallada y realista el proyecto en el que se está trabajando. Otra funcionalidad importante de este software es que permite esquematizar las curvas de distribución luminosa de las luminarias bajo estudio, lo cual es de gran utilidad ya que es posible apreciar si el diseño es acertado o requiere mejoras, a continuación, se muestra un ejemplo de las curvas de distribución luminosa obtenidas en DIALux Evo en la Figura 1.25.

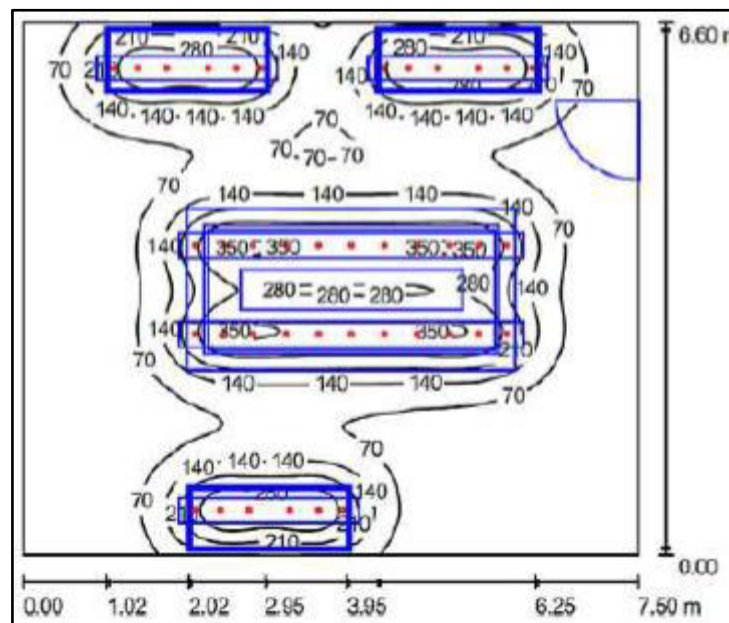


Figura 1.24. Distribución de flujo luminoso de lámparas LED utilizando DIALux Evo [34]

Principales ventajas de DIALux Evo

- Diseñar sistemas de iluminación para zonas interiores y exteriores
- Importar imágenes y planos desarrollados en AutoCAD
- Presentar renderizaciones en 3D, esquema de colores falsos, y curvas isolux

- El cálculo luminotécnico se efectúa en base a los principales estándares internacionales
- Utiliza el sistema internacional de unidades por defecto, sin embargo, también posibilita la selección del sistema imperial de unidades
- Permite la documentación rápida y eficiente de todo tipo de proyecto de iluminación

1.4.9. ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico es una etapa fundamental que debe realizarse antes de empezar cualquier tipo de proyecto, esto con la finalidad de determinar si la ejecución del proyecto es económicamente viable. Debido a esto, es importante definir ciertos conceptos que son necesarios para llevar a cabo el estudio económico de un proyecto.

1.4.9.1. Valor del dinero en el tiempo

Un término que tiene gran importancia al momento de realizar un análisis económico es el valor del dinero en el tiempo, el cual se refiere a que cantidades iguales de dinero, no poseen el mismo valor en distintos períodos de tiempo, esto se produce a causa de la inflación, la cual provoca que el dinero pierda su poder adquisitivo con el paso del tiempo.

Esto se puede entender con mayor facilidad por medio un ejemplo, supongamos que actualmente tenemos cierta cantidad de dinero, la cual nos permitiría comprar un determinado número de productos, por otro lado, si tuviéramos la misma cantidad de dinero, dentro de cinco años, estaríamos en la capacidad de comprar únicamente un número menor de productos, debido a la afectación que experimenta el precio de los productos a causa de la inflación [43].

1.4.9.2. Flujo de fondos

El flujo de fondos, o también conocido como flujo de caja, consiste en un resumen financiero que detalla todos los ingresos y egresos de dinero que experimenta un determinado proyecto durante el período de tiempo en el cual se efectúa el análisis económico. En la Figura 1.26 se puede apreciar un ejemplo de flujo de fondos.

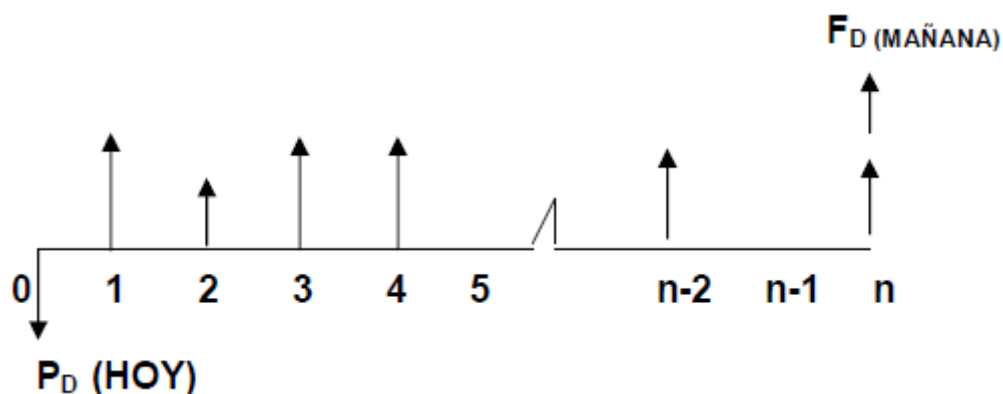


Figura 1.26. Esquema de un Flujo de Fondos [43]

Como se puede observar, el flujo de fondos consiste en una línea de tiempo, en la cual se van agregando ingresos y egresos de dinero, teniéndose que los ingresos son graficados como una flecha hacia arriba, mientras que los egresos consisten en una flecha hacia abajo.

1.4.9.3. Valor actual neto (VAN)

El Valor Actual Neto, es un indicador financiero que permite predecir las consecuencias económicas que acarrearía la realización de una inversión en un determinado proyecto. Consiste en llevar a valor presente todos los ingresos y egresos de dinero que se han especificado en el flujo de fondos, esto se efectúa para una tasa de interés establecida, la cual resulta atractiva para el inversionista; en caso de que el propósito de realizar dicho proyecto sea el de obtener réditos económicos. Cabe mencionar que existen proyectos de carácter social, en los cuales los beneficios económicos no son los principales motivantes de su realización [44].

Este indicador podría tener tres escenarios, uno de ellos es que el VAN sea igual a cero, lo cual representa que los réditos obtenidos del proyecto son exactamente iguales a los costos; otro escenario se presenta cuando el VAN resulta negativo, con lo que se tiene que los gastos superan a los beneficios, lo que implica la inviabilidad del proyecto desde el punto de vista económico. Por otro lado, el VAN podría manifestarse con un valor positivo, teniéndose entonces que existe un beneficio económico inclusive luego de cubrir todos los gastos del proyecto, lo cual conlleva a su viabilidad [45].

A continuación, se presenta la ecuación 1.12 que permite determinar el VAN del proyecto en cuestión

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{FLUJO_t}{(1+d)^t} = -I_o + \frac{FLUJO_1}{(1+d)} + \frac{FLUJO_2}{(1+d)^2} + \dots + \frac{FLUJO_n}{(1+d)^n} \quad (1.12)$$

Donde:

FLUJO: Flujo de dinero en cada período de tiempo t.

d: Tasa de interés o de descuento empleada.

l_o: Inversión inicial.

n: Cantidad de años tomada en cuenta para el análisis.

1.4.9.4. Tasa interna de retorno (TIR)

Se llama tasa de retorno a aquella que permite que todos los ingresos y egresos de dinero llevados a valor presente se igualen, con lo que se obtiene un VAN igual a cero, con este antecedente, se tiene que el TIR se puede determinar igualando la ecuación del VAN a cero, como se muestra a continuación.

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{FLUJO_t}{(1+TIR)^t} = -I_o + \frac{FLUJO_1}{(1+TIR)} + \frac{FLUJO_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FLUJO_n}{(1+TIR)^n} \quad (1.13)$$

Para un inversionista esta tasa representa el interés más elevado que está en posibilidad de pagar sin que esto acarree pérdidas.

El TIR es un indicador de gran utilidad al momento de analizar la viabilidad económica de un determinado proyecto, dado que representa la máxima rentabilidad que es posible obtener con el mismo [46].

De igual manera, el TIR puede presentar tres escenarios con su respectiva implicación, los cuales se presentan a continuación:

- TIR > d: Implica que el proyecto resultaría viable.
- TIR = d: La realización o no del mismo resulta indiferente.
- TIR < d: Implica que el proyecto no resultaría viable.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las fases que conforman al presente proyecto de titulación, las cuales son:

- a) Diseño del sistema de iluminación de dos departamentos representativos de diferentes dimensiones, lo cual permitirá determinar el número de luminarias, sus características eléctricas y lumínicas, además de su consumo de energía eléctrica estimativo.
- b) Medición del contenido armónico inyectado hacia la red eléctrica de distribución por parte de luminarias LED con dimerización de diferentes fabricantes, midiendo el contenido armónico de cada luminaria para diferentes estados de dimerización.
- c) Análisis y selección de métodos de mitigación de armónicos para el sistema de iluminación diseñado, con su respectivo análisis técnico-económico.

A continuación, en la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente trabajo de titulación, para que pueda entenderse de mejor manera.

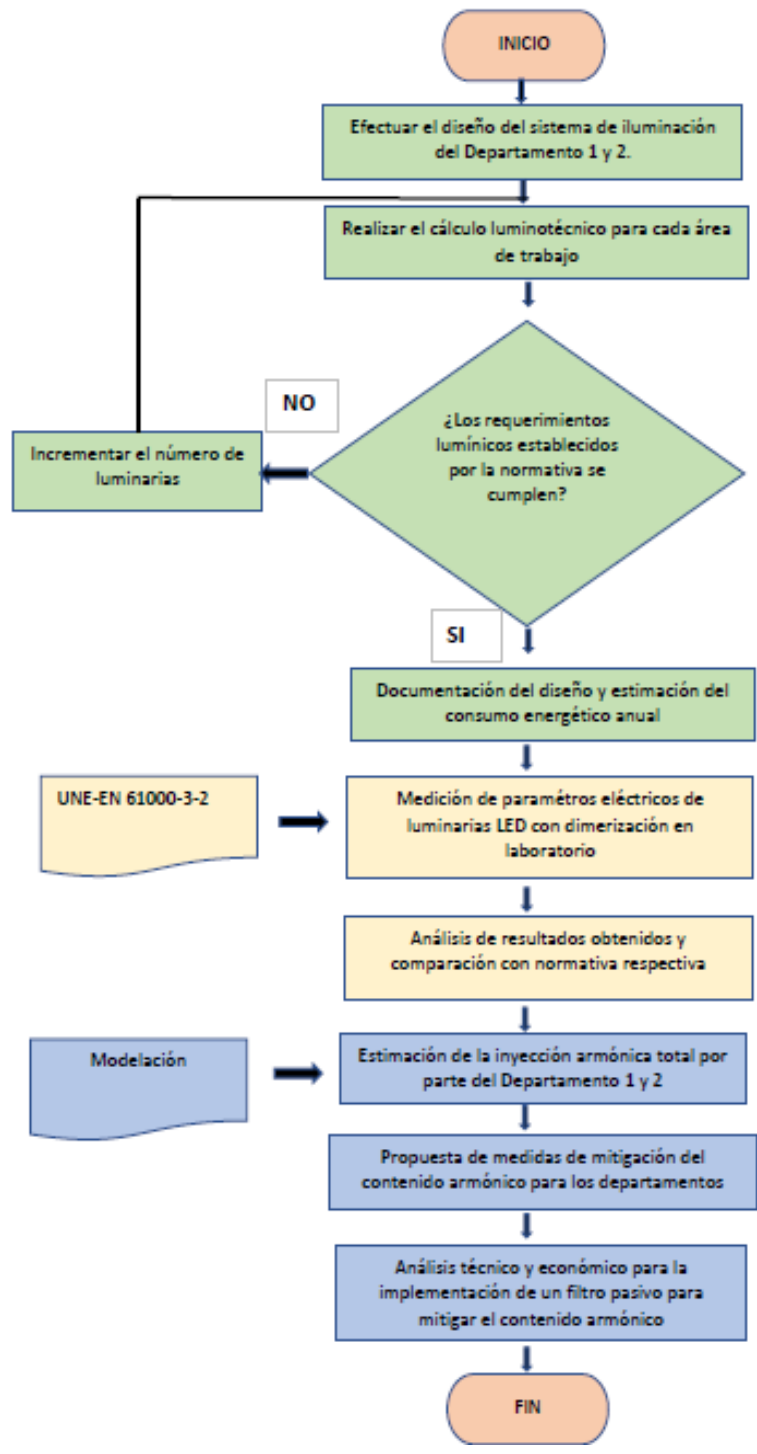


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada

2.1. DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL DE DOS DEPARTAMENTOS REPRESENTATIVOS

En primer lugar, se realiza el diseño del sistema de iluminación de dos departamentos representativos de diferentes dimensiones utilizando el software computacional DIALux Evo, para poder determinar las características eléctricas y lumínicas de las luminarias LED

necesarias para iluminar dichos departamentos, considerando los requerimientos lumínicos para cada área de trabajo establecidos por la normativa estadounidense [35]. El diseño permitirá determinar el consumo de potencia estimado de dichos sistemas de iluminación. Los datos obtenidos mediante los diseños serán de utilidad para la selección de los métodos adecuados para la mitigación de armónicos, así como también nos da información necesaria para realizar la evaluación técnica y económica de las medidas de mitigación que serán propuestas.

2.1.1. ESTUDIO PRELIMINAR

Antes de empezar a desarrollar el diseño del sistema de iluminación, es necesario analizar los detalles propios del lugar de trabajo, para tener conocimiento de las necesidades visuales y estéticas de cada área, y así poder realizar un diseño eficiente y viable. En esta etapa se precisa examinar información como: ubicación geográfica, orientación, detalles constructivos, entre otros. El análisis de estos datos nos permitirá determinar los impedimentos y las prestaciones propias del establecimiento [35].

Entre los impedimentos propios del lugar podemos encontrar limitaciones económicas y arquitectónicas. Dentro del aspecto económico se necesita realizar un estudio minucioso a largo plazo, dado que una propuesta de iluminación que requiera de una inversión inicial dispendiosa podría resultar ser considerablemente más económica con el pasar del tiempo, debido a los gastos operativos que se reducirían, tales como el mantenimiento y consumo de potencia [35].

Con respecto a las prestaciones, el establecimiento podría tener características muy ventajosas para el uso eficiente del sistema de iluminación, como por ejemplo ventanas amplias, y una orientación conveniente que permita el ingreso de la luz natural del sol, sin que sea obstruida por otros edificios contiguos.

2.1.2. PLANIFICACIÓN INICIAL

En esta etapa se elabora una planificación inicial superficial, para la cual se requiere de información básica necesaria para el diseño, tal como uso que se le asignará a cada área de trabajo, sus dimensiones y tipo de sistema de iluminación a emplearse.

En base a esta información se realiza la planificación inicial, se determina si el sistema de iluminación a utilizarse es general, localizado o una combinación de ambos [35]. De igual forma se escoge el tipo de luminaria que se utilizará, teniendo opciones como luminarias incandescentes, fluorescentes y LED, su selección se basa en el análisis de sus principales

características lumínicas y eléctricas, tales como la eficacia lumínica, la potencia consumida, temperatura del color, reproducción del color, tiempo de encendido y vida útil. En la Figura 2.1 se ilustra un sistema de iluminación con alumbrado general, mientras que en la Figura 2.2 se presenta un alumbrado localizado.

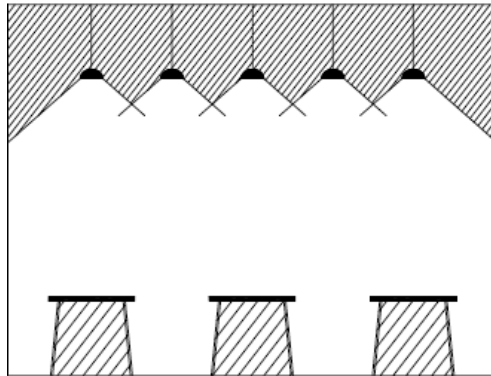


Figura 2.1. Alumbrado General [35]

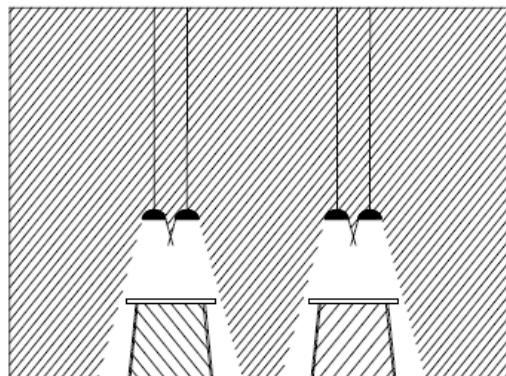


Figura 2.2. Alumbrado Localizado [35]

2.1.3. DISEÑO ESPECÍFICO

2.1.3.1. Cálculo de la cantidad de luminarias

Existen algunos métodos mediante los cuales es posible llevar a cabo el cálculo de la cantidad de luminarias necesarias para obtener una iluminación adecuada, que cumpla con los requerimientos mínimos establecidos por la normativa. Manualmente es posible realizarlo con dos métodos, el primero es el método de lúmenes y el segundo es el método de punto por punto. El método de lúmenes es utilizado cuando se requiere una iluminación uniforme del establecimiento, mientras que el método de punto por punto se emplea cuando es necesario conocer el valor de luminancia en lugares exactos, este método entrega valores más precisos, sin embargo, su utilización resulta más tediosa, especialmente cuando se requiere iluminar áreas extensas [33].

Además, es posible calcular el número de luminarias mediante la utilización de un software computacional, esta es la forma más eficiente de ejecutar el cálculo. Existe una gran variedad de estos en el mercado, sin embargo, para la realización del presente trabajo de titulación se ha decidido utilizar el Software DIALux Evo, debido a que es uno de los programas especializados preferidos por los profesionales dedicados al diseño de sistemas de iluminación artificial de todo tipo, el cual cuenta con prestaciones de renderización, misma que permite visualizar a detalle el proyecto para verificar que el diseño esté correcto [33]. De igual forma, dicho software permite obtener representaciones de las áreas de trabajo por medio de colores falsos, así como también curvas isolux, lo cual permite verificar que el cálculo ha sido efectuado correctamente [34].

2.1.3.2. Diseño con DIALux

El software DIALux Evo posibilita efectuar el diseño de sistemas de iluminación de una manera eficiente y precisa, debido a que permite la importación de planos arquitectónicos desarrollados en AutoCAD para que, en base a estos planos, se realice una renderización en 3D que permita una visualización óptima de las áreas de trabajo [36].

Para el diseño del sistema de iluminación en DIALux Evo se requiere de información como:

- Dimensiones de cada área de trabajo, altura del techo y altura del plano de trabajo.
- Tipo de actividad a la que se destinará cada área de trabajo.
- Grados de reflexión de pisos, paredes y techos.
- Tipo de sistema de iluminación requerido, ya sea general, localizado, o una combinación de ambos.
- Plano arquitectónico desarrollado en AutoCAD para poder realizar el renderizado en 3D de la construcción en base a este, con las texturas de pisos, paredes y techos proporcionadas.
- Mueblería para utilizar en cada área de trabajo.
- Normativa requerida.
- Características de las luminarias a utilizarse [33].

Luego de proporcionar toda esta información, el software permite el cálculo del número de luminarias en cada área de trabajo, así como también proporciona información de niveles

de iluminación, eficacia lumínica, potencia y una estimación de la energía a consumirse por año, en base a los tiempos de uso de las luminarias esperados para cada área de trabajo.

2.1.4. DOCUMENTACIÓN

Para concluir con el diseño del sistema de iluminación es de suma importancia realizar la documentación de este, lo cual permite demostrar la funcionalidad del diseño en base al análisis de los valores de iluminancia promedio calculados para cada área de trabajo.

2.2. MEDICIÓN

La medición del contenido armónico de las luminarias LED con dimerización se realizó en el Laboratorio de Luminotecnia del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE).

2.2.1. CIRCUITO DE MEDICIÓN

El diagrama del circuito empleado para efectuar las mediciones necesarias se presenta a continuación en la Figura 2.3.

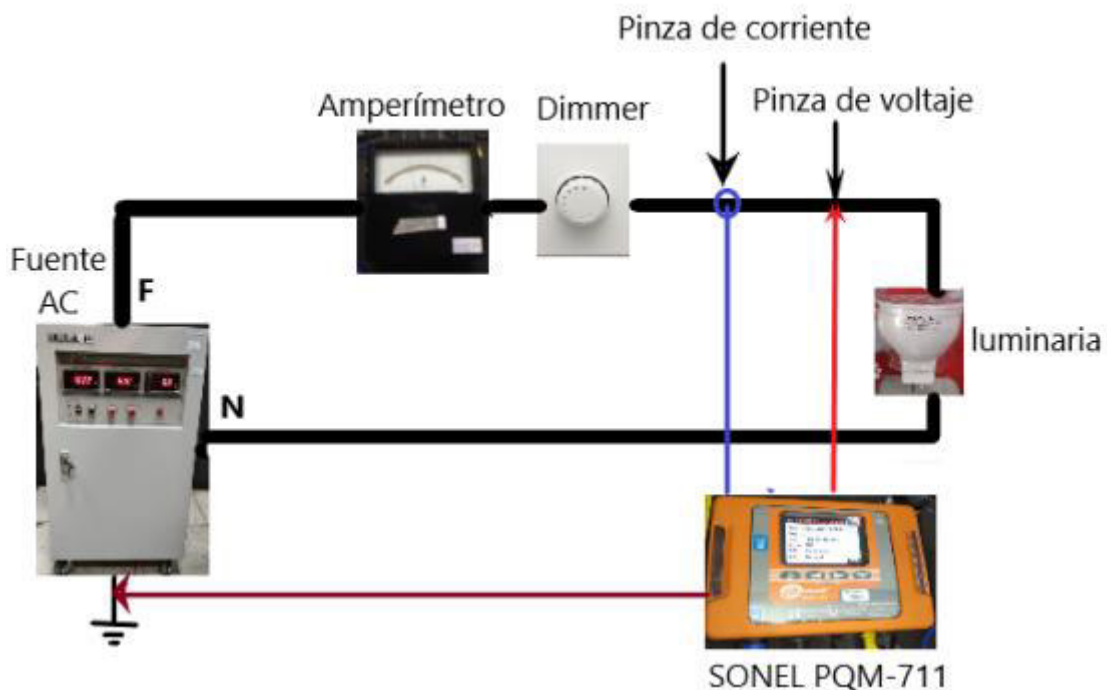


Figura 2.3. Diagrama esquemático del circuito de medición [Elaboración propia]

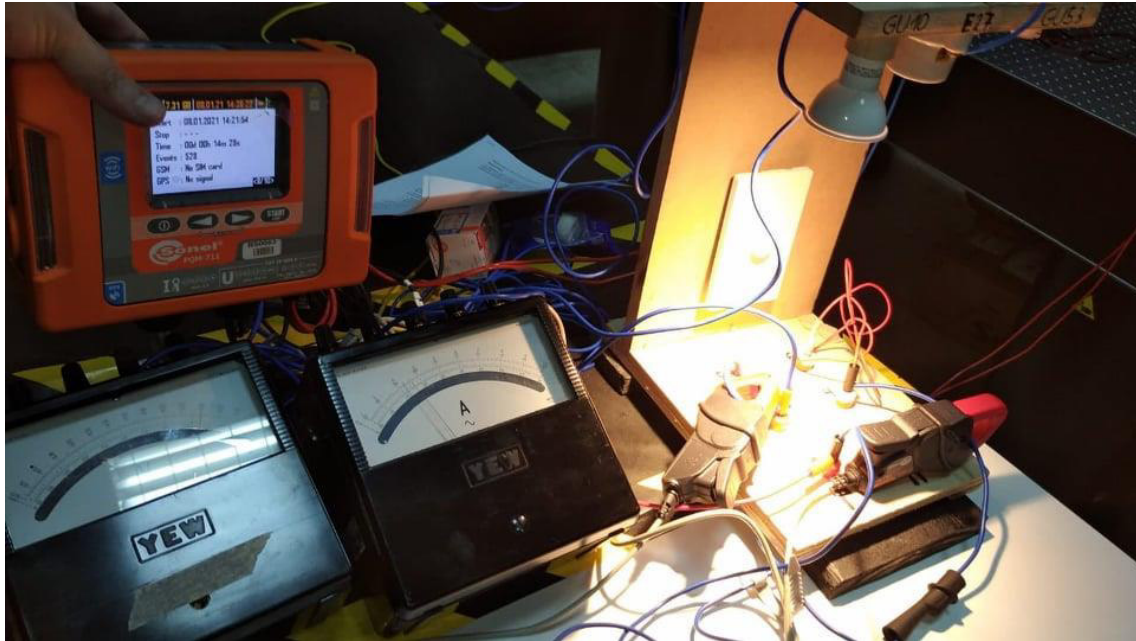


Figura 2.4. Conexión de equipos para realización de ensayos [Elaboración propia]

2.2.2. EQUIPO DE MEDICIÓN

La medición del contenido armónico se ejecuta utilizando un analizador de armónicos que satisface los requisitos de los equipos de medición según la Norma IEC-61000-4-7 y la Norma IEC-6100-4-30. El analizador mencionado permite medir la distorsión armónica total de voltaje y de corriente, las componentes armónicas individuales, y el ángulo de desfase de estas. En la Tabla 2.1 se exponen las especificaciones técnicas de dicho analizador de armónicos, pudiéndose apreciar que posee una resolución y precisión que permiten trabajar perfectamente con las luminarias que se someterán a ensayos.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del analizador de armónicos [37]

Especificaciones	Resolución	Precisión
Voltaje AC	0-1000 V	0,01 % Vn
Corriente AC	Depende de la pinza	0,01 % Rango nominal
Frecuencia	40-70 Hz	0,01 Hz
Factor de Potencia	0-1	0,01
Armónicos de Voltaje	0-1000 V	0,01 % Vn
Armónicos de Corriente	Depende de la pinza	0,01 % Rango nominal
THD de Voltaje	0-100 %	0,10%

THD de Corriente	0-100 %	0,10%
Ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje armónicos	(-180°) ... (+180°)	0,1°

2.2.3. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Las mediciones se efectúan empleando los equipos descritos previamente, y siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 2.5. Además, se emplea el circuito de medición que se ilustra en la Figura 2.3.

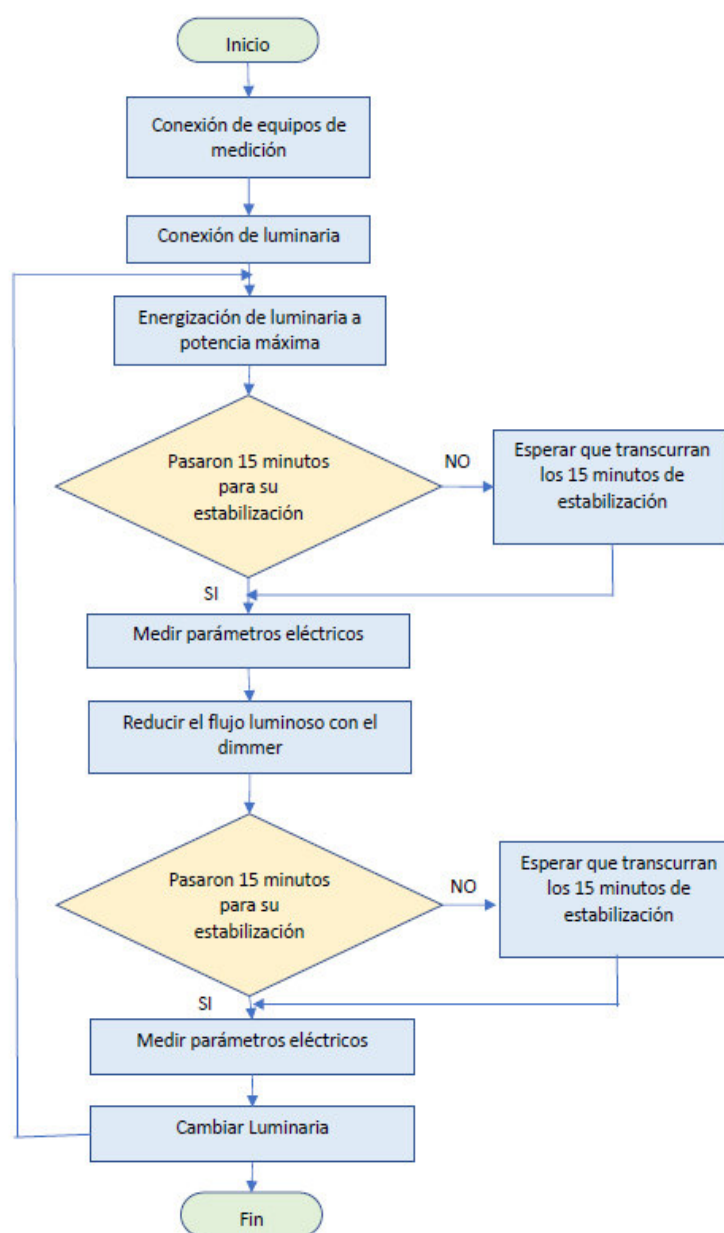


Figura 2.5. Diagrama de flujo del proceso de medición [Elaboración propia]

2.2.3.1 Ensayos de laboratorio

Esta etapa consiste en la medición del contenido armónico inyectado por luminarias con dimerización de manera individual, seleccionando luminarias de diferentes fabricantes, potencias y tipos de boquilla [1][38].

Se someterán a los ensayos a seis luminarias LED de diferentes con dimerización disponibles comercialmente en el mercado nacional. Sus características se presentan en la Tabla 2.2. Todas las luminarias están diseñadas para operar a 120V, y tienen potencias nominales desde 5w hasta 9w [39].

Tabla 2.2. Características de las luminarias sometidas a ensayos

Marca	Potencia [W]	Boquilla	Temperatura del Color	Voltaje [V]	Frecuencia [Hz]	Vida Útil [horas]
Luminaria A	9	E-27	2700	110	60	30000
Luminaria B	5,5	GU10	2700	120	50/60	25000
Luminaria C	6	GU10	3000	110-130	50/50	25000
Luminaria D	6	GU10	4000	110-130	50/60	15000
Luminaria E	8	E-27	4000	100-130	50/60	25000
Luminaria F	5	E-27	2700	110	60	30000

Los ensayos se llevarán a cabo para tres estados de dimerización diferentes de cada luminaria, para poder apreciar el efecto de la variación del flujo luminoso en la inyección de armónicos. De igual manera se medirán los valores eléctricos relevantes tales como potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, potencia de distorsión y factor de potencia [1][8]. Todo esto se realizará con una temperatura ambiente de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Las luminarias se energizan utilizando una fuente controlada de voltaje AC con una precisión de $\pm 2\%$, con un voltaje de 120 V.

Antes de realizar las mediciones, es primordial que las luminarias se encuentren estabilizadas, para la cual nos referimos a la normativa UNE-EN 61000-3-2, la cual dicta las condiciones de ensayo para equipos de iluminación, estableciendo que las lámparas: “Deben estar funcionando durante al menos 15 minutos antes de realizarse una serie de medidas” [40].

Debido a esto, se energiza cada luminaria a potencia máxima (es decir sin dimerización) por 15 minutos para su estabilización, una vez transcurrido este tiempo se procede a tomar las siguientes mediciones:

- Potencias consumidas (Activa, Reactiva, Aparente, Distorsión)

- Factor de potencia
- Voltaje y Corriente
- Componentes armónicas individuales de voltaje y corriente, con el ángulo de desfasaje.
- THD de voltaje y corriente.

El procedimiento se repite energizando la luminaria con estados de dimerización que permitan operar a potencia nominal y a una potencia mínima. Esto se realiza para cada una de las seis luminarias LED con dimerización seleccionadas para el presente trabajo de titulación.

2.2.3.2 Ensayos adicionales

De igual manera se realizarán ensayos adicionales, para comprender mejor la inyección armónica de este tipo de luminarias. Los ensayos adicionales incluyen mediciones del contenido armónico inyectado por luminarias LED con dimerización conectadas en paralelo, esto se realiza con la finalidad de apreciar el efecto que tiene el incremento del número de este tipo de luminarias en la inyección del contenido armónico [41][42].

Adicionalmente, se medirán los valores de la inyección armónica de una luminaria incandescente de 60W para diferentes estados de dimerización, con el objetivo de apreciar la inyección armónica del dispositivo de dimerización por sí solo, dado que la luminaria incandescente no provoca distorsión armónica al no estar formada por elementos no lineales.

2.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

Al momento de implementar un sistema de iluminación más eficiente, es necesario analizar los aspectos económicos que esto conlleva, dado que generalmente los mecanismos que permiten un mayor ahorro energético demandan una inversión inicial superior a la que se tendría en caso de implementar un sistema de iluminación convencional. Con estos antecedentes, es necesario analizar si la inversión inicial superior, representa un ahorro energético que permita lograr la viabilidad económica de su implementación.

El análisis económico es de suma importancia, ya que permite decidir si el proyecto se lleva a cabo o no, luego de analizar su viabilidad económica tomando en consideración todos los factores que influyen en la factibilidad del proyecto, tales como: costo de instalación, ahorro energético y vida útil.

Para efectuar el análisis económico, se determinan los indicadores VAN, y TIR, definidos en el Capítulo 1. Asimismo, se calcula el flujo de fondos para el período de tiempo de análisis.

3. APLICACIÓN METODOLÓGICA

En este apartado se muestran los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior. En primer lugar, se presenta el diseño del sistema de iluminación de los dos departamentos, con los valores de los cálculos lumínicos obtenidos mediante la utilización del software DIALux Evo. Luego, se muestran los valores adquiridos mediante las mediciones, con gráficas representativas para visualizar de mejor manera dichos resultados. Y, finalmente, se detalla la propuesta de mitigación del contenido armónico, con el respectivo análisis técnico y económico.

3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

3.1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los departamentos representativos seleccionados pertenecen al edificio Imagine, mismo que se encuentra ubicado en la parroquia González Suárez en la ciudad de Quito, estos departamentos han sido elegidos debido a que dicho edificio implementará sistemas de iluminación artificial con luminarias LED con dimerización, una vez culminada su construcción.

La implementación de las luminarias mencionadas anteriormente se efectúa con la finalidad de mejorar la eficiencia energética del lugar, dado el bajo consumo de potencia de este tipo de luminarias. Asimismo, su empleo se ve motivado por las resoluciones ligadas a ecoeficiencia dispuestas por la municipalidad de la ciudad de Quito, las cuales establecen la llamada Matriz de Ecoeficiencia, misma que permite a las empresas constructoras el incremento de pisos por suelo creado, siempre que los proyectos propuestos sean planificados con tecnologías verdes que permitan el uso eficiente de agua y de energía eléctrica. Adicionalmente, su incursión se ha incrementado debido a que permiten una enorme mejora en el confort visual del usuario, el cual puede controlar el nivel de iluminación de acuerdo con sus necesidades [47][48].

3.1.2. PRESTACIONES DE LOS DEPARTAMENTOS

Con respecto a las prestaciones, el establecimiento podría tener características muy ventajosas para el uso eficiente del sistema de iluminación, como por ejemplo ventanas amplias, y una orientación conveniente que permite el ingreso de la luz natural del sol, sin que se vea obstruida por otros edificios contiguos.

A continuación, se muestra una fotografía del edificio en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Edificio Imagine [Elaboración propia]

Como se puede observar, nuestro caso de estudio presenta grandes prestaciones, tales como amplios ventanales, excelente ubicación geográfica y ausencia de sombras provocadas por otras construcciones cercanas.

3.1.3 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS

3.1.3.1 Dimensiones

Como se mencionó anteriormente, para la planificación inicial se requiere saber el uso que se le dará a cada área de trabajo, y sus respectivas dimensiones, dicha información fue obtenida por medio del plano arquitectónico desarrollado en AutoCAD, a continuación, se muestra en la Tabla 3.1 la información para el Departamento 1, mientras que la Tabla 3.2 lo hace para el Departamento 2.

Tabla 3.1. Información de cada ambiente de trabajo para Departamento 1

Ambiente de Trabajo	Área (m²)	Altura (m)	Altura Plano Útil (m)
----------------------------	-----------------------------	-------------------	------------------------------

Dormitorio Máster	14,2850	2,8	0,61
Dormitorio 1	10,7325	2,8	0,61
Sala-Comedor	18,3116	2,8	0
Cocina	6,3603	2,8	0,8
Lavandería	2,3270	2,8	0,92
Baño D. Máster	3,5649	2,8	0,8
Baño 1	3,1900	2,8	0,8
Pasillo	3,7439	2,8	0

Tabla 3.2. Información de cada ambiente de trabajo para Departamento 2

Ambiente	Área (m²)	Altura (m)	Altura Plano Útil (m)
Dormitorio Máster	16,0301	2,8	0,61
Dormitorio 1	11,4554	2,8	0,61
Dormitorio 2	13,7352	2,8	0,61
Sala	12,8278	2,8	0
Estar TV	6,0744	2,8	0
Cocina-Comedor	20,052	2,8	0,8
Cuarto de Máquinas	2,1	2,8	0,92
Baño D. Máster	3,9879	2,8	0,8
Baño D1	3,1899	2,8	0,8
Baño D2	3,0385	2,8	0,8
Baño Social	2,2501	2,8	0,8
Balcón	2,6258	2,8	0
Pasillo	3,2854	2,8	0

3.1.3.2 Planos arquitectónicos

Con base en el plano arquitectónico proporcionado en AutoCAD es posible realizar el respectivo renderizado de los departamentos utilizando el programa computacional DIALux Evo para poder visualizarlos en 3D y realizar el cálculo lumínico. A continuación, se presentan los planos en 2D realizados en DIALux Evo con sus respectivas áreas de trabajo, para su posterior renderización 3D. En la Figura 3.2 se ilustra el plano para el Departamento 1, a su vez, la Figura 3.3 lo hace para el Departamento 2.

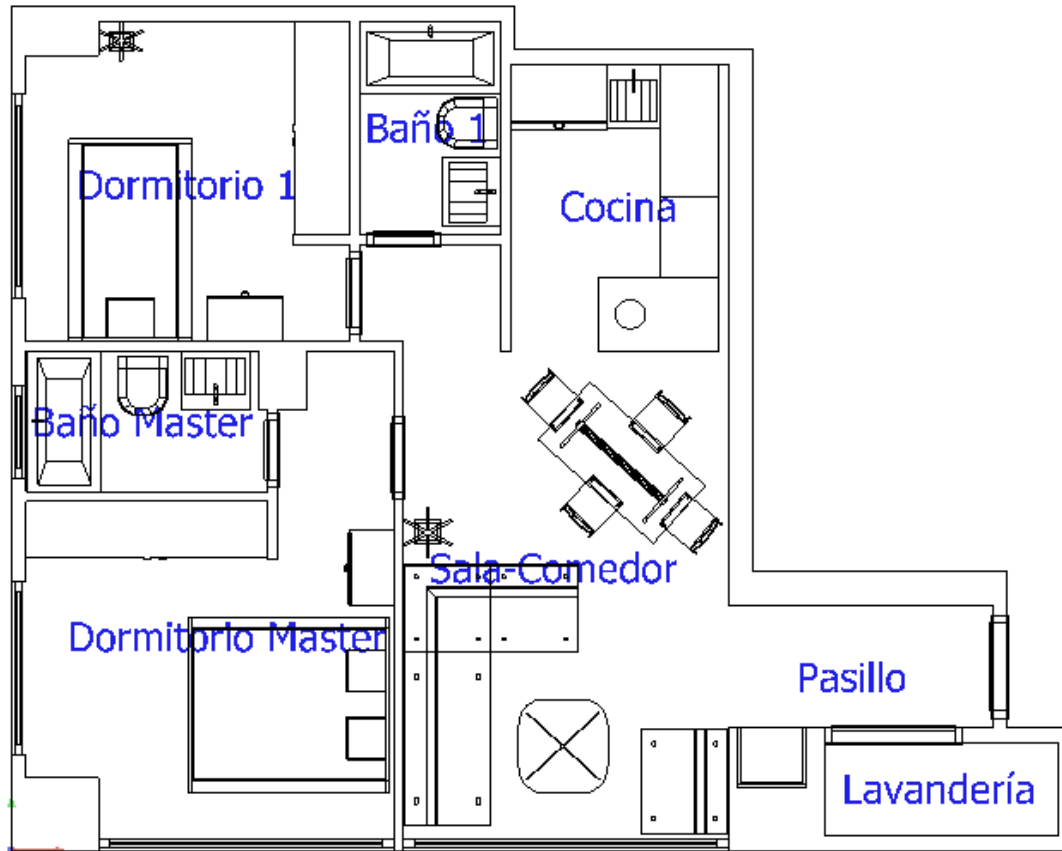


Figura 3.2. Plano del Departamento Pequeño con sus respectivas áreas de trabajo
[Elaboración propia]

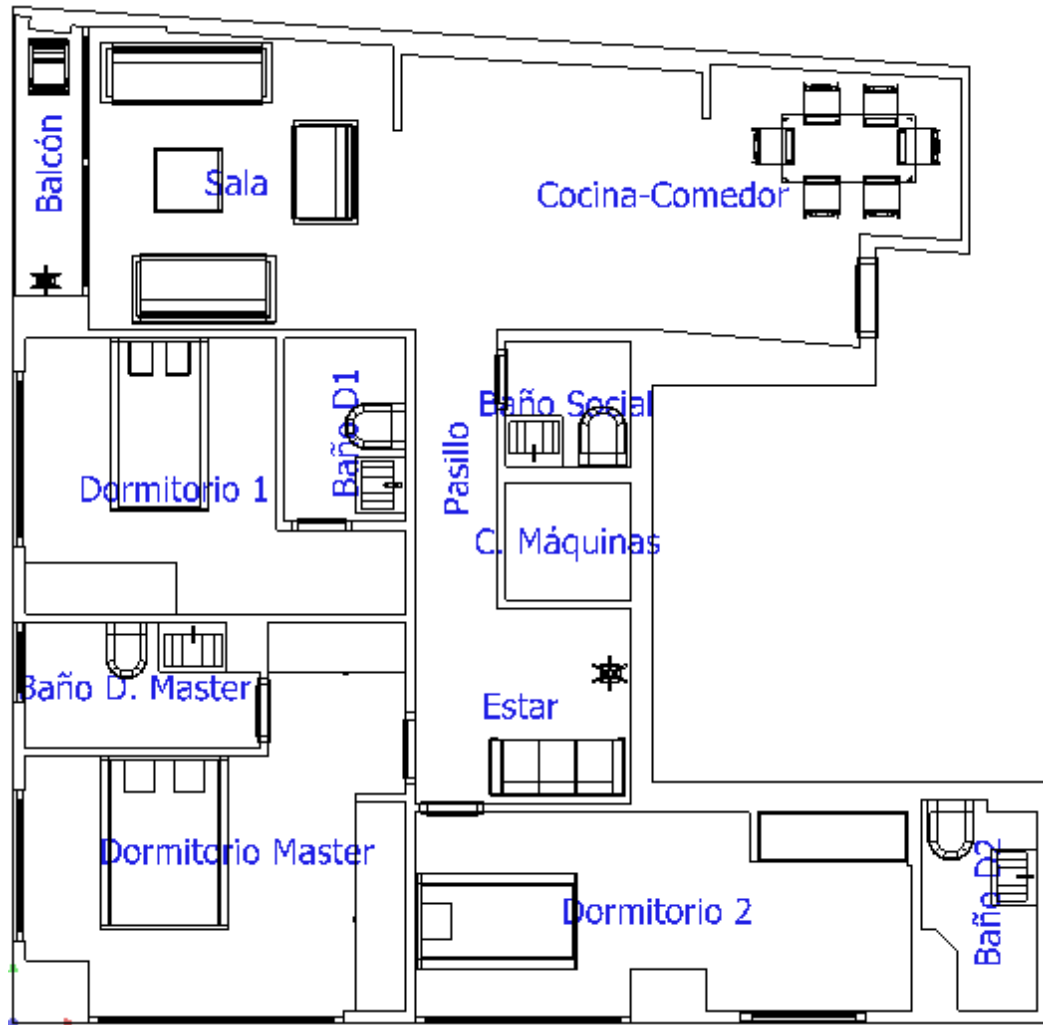


Figura 3.3. Plano del Departamento Grande con sus respectivas áreas de trabajo [Elaboración propia]

3.1.3.3 Texturas

Luego de dibujar cada área de trabajo y realizar el respectivo renderizado 3D, es necesario añadir las texturas que van a utilizarse en pisos, paredes y techos.

DIALux Evo permite seleccionar una gran variedad de texturas y colores de todo tipo, desde madera hasta hormigón, como se presenta en la Figura 3.4.

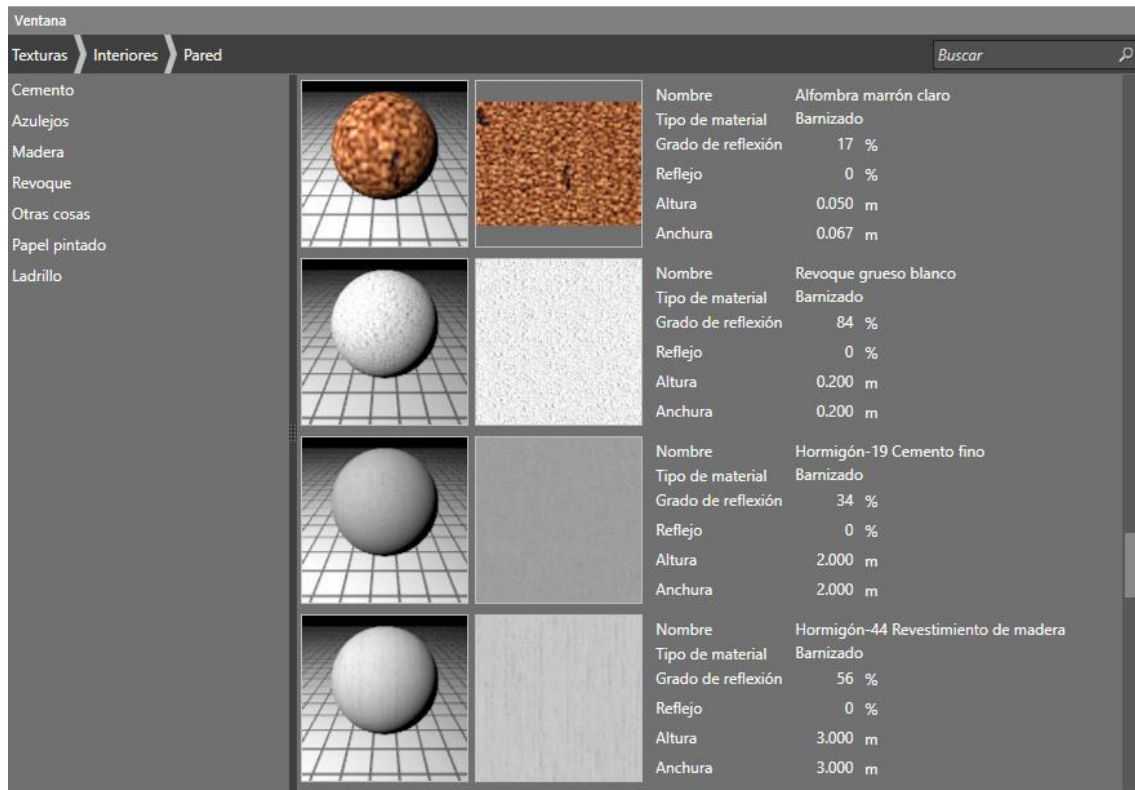


Figura 3.4. Ejemplos de colores y texturas disponibles en DIALux Evo [Elaboración propia]

Cuando se tiene como objetivo optimizar el consumo de energía eléctrica en sistemas de iluminación, se utiliza texturas y colores con un excelente grado de reflexión de la luz, razón por la cual se ha escogido las siguientes texturas para piso, pared y techo.

Piso: Color Blanco Tráfico con grado de reflexión de 88%, Tipo de material barnizado

Pared: Revoque Grueso Blanco, Grado de reflexión 86%. Tipo de material barnizado.

Techo: Revoque Grueso Blanco, Grado de reflexión 86%. Tipo de material barnizado.

En la Figura 3.5 se exhibe las características de la textura escogida para el piso.

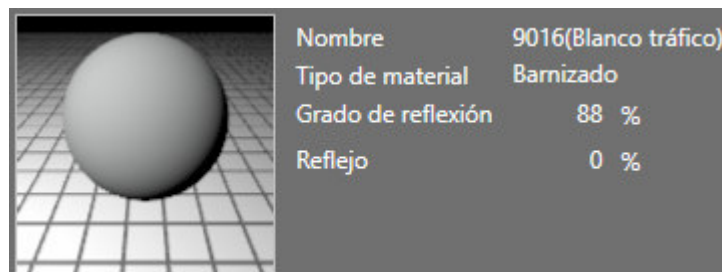


Figura 3.5. Grado de reflexión del material seleccionado para el piso de los departamentos [Elaboración propia]

3.1.4. NORMATIVA

DIALux brinda la posibilidad escoger la normativa que utilizaremos para el diseño de iluminación, con lo cual es posible elegir entre la normativa europea, la normativa estadounidense, y la normativa japonesa, como se observa en la Figura 3.6. Para el presente trabajo de titulación se ha considerado que la mejor opción es usar la normativa estadounidense IESNA Lighting Handbook (10th edition), dado que la misma presenta información más detallada y específica acerca de los requerimientos lumínicos de las distintas áreas de trabajo de uso residencial, en comparación con las demás normativas [49].

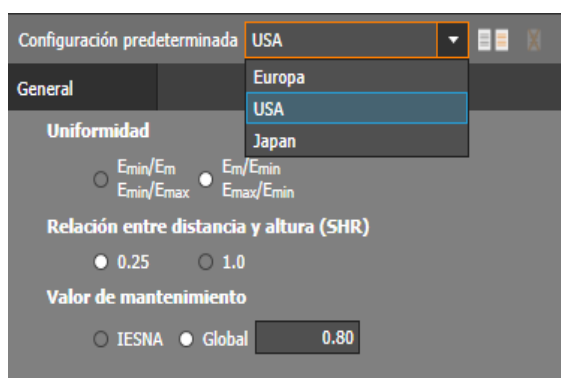


Figura 3.6. Normativas predeterminadas en DIALux Evo [Elaboración propia]

A continuación, en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4 se exponen los requerimientos lumínicos necesarios para cada área de trabajo del Departamento 1 y el Departamento 2, respectivamente, con base a lo que establece la normativa IESNA Lighting Handbook (10th edition) [49].

Tabla 3.3. Requerimientos lumínicos para cada ambiente de trabajo del Departamento 1 establecidos por la normativa

Ambiente de Trabajo	Requerimiento Lumínico (Ix)	Índice de Reproducción del color	Factor de Mantenimiento
Dormitorio Máster	200	80	0,8
Dormitorio 1	200	80	0,8
Sala-Comedor	100	80	0,8
Cocina	300	80	0,8
Lavandería	200	80	0,8
Baño D. Máster	100	80	0,8
Baño 1	100	80	0,8
Pasillo	30	40	0,8

Tabla 3.4. Requerimientos lumínicos para cada ambiente de trabajo del Departamento 2 establecidos por la normativa

Ambiente	Requerimiento Lumínico (lx)	Índice de Reproducción del color	Factor de Mantenimiento
Dormitorio Máster	200	80	0,8
Dormitorio 1	200	80	0,8
Dormitorio 2	200	80	0,8
Sala	100	80	0,8
Estar TV	30	80	0,8
Cocina-Comedor	300	80	0,8
Cuarto de Máquinas	200	80	0,8
Baño D. Máster	100	80	0,8
Baño D1	100	80	0,8
Baño D2	100	80	0,8
Baño Social	100	80	0,8
Balcón	30	80	0,8
Pasillo	30	40	0,8

3.1.5. SELECCIÓN DE LUMINARIAS

La selección de las luminarias a utilizar en el sistema de iluminación se realiza minuciosamente, y se lo hace considerando características muy importantes tales como: tipo de boquilla, eficacia lumínica, flujo luminoso, potencia, vida útil y precio.

En primer lugar, se escoge el tipo de boquilla de la luminaria, para uso residencial es recomendable utilizar luminarias con boquillas GU10, esto debido a que este tipo de boquillas son utilizadas generalmente en departamentos, por su fácil montaje en techos falsos, y por su excelente estética. Luego de esto, se analiza la eficacia lumínica de las luminarias, dicha eficacia representa los lúmenes que está en capacidad de producir la luminaria por cada vatio consumido. También es muy importante considerar la vida útil y el precio de la luminaria, ya que estas características determinan cual luminaria tiene mayor factibilidad económica [33].

A continuación, en la Tabla 3.5 se exhiben las principales luminarias LED con boquilla GU10 con dimerización disponibles en el mercado nacional que han sido analizadas con sus respectivas características, se utilizan nombres genéricos para no aludir a las marcas en cuestión.

Tabla 3.5. Características de principales luminarias LED con boquilla GU10 con dimerización

Marca	Potencia [W]	Flujo Luminoso [lm]	Eficacia Lumínica [lm/w]	Boquilla	Temperatura del Color	Vida Útil [horas]	Costo [\$]
Luminaria M	5	380	76	GU10	6000	15000	3,11
Luminaria B	5,5	550	100	GU10	2700	25000	3,5
Luminaria C	6	450	75	GU10	3000	25000	3,9
Luminaria D	7	550	78,57	GU10	4000	15000	3,7

Luego de analizar las características de dichas luminarias, se determinó que la mejor opción es utilizar la luminaria B, dado que posee la mayor eficacia lumínica de todas alcanzando un valor de 100 [lm/w], y la vida útil más larga junto a la luminaria C con 25000 horas. Así como también, tiene el segundo costo más bajo.

Las luminarias B y C tienen características similares, sin embargo, la luminaria C posee una menor eficacia lumínica, y un costo mayor. De igual manera, a pesar de que luminaria M tiene el costo más bajo, esta presenta una eficacia lumínica y una vida útil mucho menor en contraste con la luminaria B.

DIALux Evo permite escoger luminarias de varios catálogos de una gran cantidad de fabricantes, sin embargo, es posible seleccionar cualquier luminaria y definir sus valores eléctricos y lumínicos, como se observa en la Figura 3.7. Esto se realiza para lograr que dichos valores sean idénticos a los de la luminaria que ha sido escogida previamente y que está disponible en el mercado nacional.

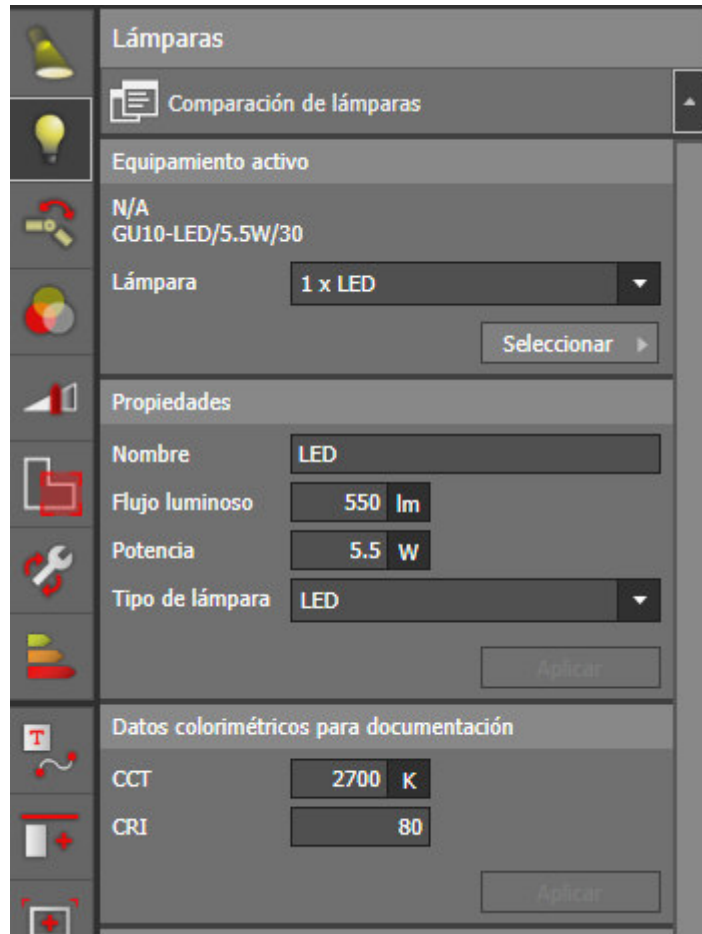


Figura 3.7. Características eléctricas y lumínicas de la luminaria [Elaboración Propia]

Como se puede observar, es posible definir los valores de flujo luminoso, consumo de potencia, temperatura del color, e índice de reproducción cromático, con lo cual se puede simular el sistema de iluminación de una manera más precisa y acertada.

3.1.6. CÁLCULO LUMINOTÉCNICO

Una vez establecidos estos parámetros, se procede a insertar las luminarias en las áreas de trabajo respectivas, es posible seleccionar que el programa calcule y ubique las luminarias de manera automática, así como también se puede ubicarlas de acuerdo con criterios propios. Posterior a la ubicación todas las luminarias, es necesario realizar el cálculo luminotécnico para comprobar que el nivel de iluminación sea el correcto en el plano útil de cada área de trabajo. Al finalizar el cálculo luminotécnico DIALux Evo muestra el sumario de resultados, y marca con color verde las áreas de trabajo que cumplen con los niveles mínimos de iluminación establecidos por la normativa, por otro lado, marca con color rojo aquellas áreas que no cumplen con los niveles mínimos de iluminación. En la

Figura 3.8 se muestra el sumario de resultados obtenido luego del primer cálculo luminotécnico.

Sumario de los resultados

Buscar

<ul style="list-style-type: none"> Baño 1 ■ Plano útil (Baño 1) ■ 153 lx 9.62 ■
<ul style="list-style-type: none"> Baño Master ■ Plano útil (Baño Master) ■ 135 lx 4.22 ■
<ul style="list-style-type: none"> Cocina ■ Plano útil (Cocina) ■ 401 lx 4.49 ■
<ul style="list-style-type: none"> Dormitorio 1 ■ Plano útil (Dormitorio 1) ■ 258 lx 549 ■
<ul style="list-style-type: none"> Dormitorio Master ■ Plano útil (Dormitorio Master) ■ 124 lx 564 ■
<ul style="list-style-type: none"> Lavandería ■ Plano útil (Lavandería) ■ 182 lx 2.65 ■
<ul style="list-style-type: none"> Pasillo ■ Plano útil (Pasillo) ■ 119 lx 372 ■
<ul style="list-style-type: none"> Sala-Comedor ■

Figura 3.8. Sumario de resultados con el incumplimiento de los valores mínimos requeridos en dos áreas de trabajo (Dormitorio Máster y Lavandería) [Elaboración propia]

Como se puede observar, existen dos áreas de trabajo que no cumplen con los niveles mínimos de iluminación requeridos, tales como el Dormitorio Máster y la Lavandería, por lo cual es necesario reconfigurar la ubicación de las luminarias, o de ser preciso, incrementar la cantidad de luminarias en dichas áreas de trabajo para cumplir con los requerimientos establecidos por la normativa. En este caso reconfigurar la ubicación de las luminarias no bastó para alcanzar los niveles de iluminación requeridos en todo el plano de trabajo, por lo que se necesitó aumentar el número de luminarias y ubicarlas de manera óptima para

que así sea posible tener el nivel de iluminación establecido por la normatividad. En la Figura 3.9 se muestra el sumario de los resultados obtenidos del cálculo luminotécnico luego de los ajustes realizados.

Sumario de los resultados

Buscar

Baño 1				
Plano útil (Baño 1)				
	153 lx	11.3		
Baño Master				
Plano útil (Baño Master)				
	135 lx	3.74		
Cocina				
Plano útil (Cocina)				
	401 lx	4.90		
Dormitorio 1				
Plano útil (Dormitorio 1)				
	258 lx	385		
Dormitorio Master				
Plano útil (Dormitorio Master)				
	213 lx	361		
Lavandería				
Plano útil (Lavandería)				
	349 lx	1.81		
Pasillo				
Plano útil (Pasillo)				
	120 lx	375		
Sala-Comedor				

Figura 3.9. Sumario de resultados con el cumplimiento de los valores mínimos requeridos para todas las áreas de trabajo [Elaboración propia]

Como se puede observar, todas las áreas de trabajo están marcadas con color verde, lo cual indica que se cumple con los niveles de iluminación mínimos requeridos.

3.1.7. DOCUMENTACIÓN

Posterior a comprobar que el diseño del sistema de iluminación esté desarrollado correctamente por medio de los cálculos lumínicos, se procede a la documentación, la cual

viene a ser una de las etapas más importante del proyecto, en vista de que esta permite mostrar un resumen de los resultados relevantes obtenidos mediante la simulación del sistema de iluminación [46].

En la Tabla 3.6 se presentan los parámetros importantes de cada área de trabajo del Departamento 1 obtenidos de los cálculos lumínicos utilizando el software DIALux Evo, dentro de estos parámetros se encuentran los valores de potencia total instalada en iluminación, número de luminarias, nivel de iluminación calculado con el programa, y nivel de iluminación nominal requerido por la normativa, de igual manera se presenta el consumo de energía eléctrica estimado por año. Todos estos parámetros se presentan para cada área de trabajo.

Tabla 3.6. Resumen de resultados obtenidos en DIALux en el diseño del sistema de iluminación para el Departamento 1

Área	# Luminarias	Potencia Total [W]	Nivel de Iluminación [lx]		Consumo[kWh/a]
			Calculado	Nominal	
Dormitorio Máster	7	38,5	213	≥200	67 a 110
Dormitorio 1	6	33	258	≥200	57 a 91
Sala-Comedor	7	38,5	137	≥100	47 a 74
Cocina	6	33	401	≥300	130
Lavandería	2	11	321	≥200	6
Baño Máster	1	5,5	136	≥100	3 a 5
Baño 1	1	5,5	153	≥100	5
Pasillo	1	5,5	119	≥30	6

Como se puede observar, los niveles de iluminación calculados con el programa para cada área de trabajo son superiores a los niveles mínimos requeridos por la normativa, lo cual muestra que el diseño es acertado.

El área de la Cocina es en donde se espera un mayor consumo de energía eléctrica, a pesar de que existen áreas como el Dormitorio Máster o la Sala-Comedor que necesitan una cantidad mayor de luminarias. La estimación de que la cocina consume más energía se debe a que esta presenta un tiempo de uso previsto mayor que las demás áreas de trabajo. En la cocina se prevé un tiempo de uso estimado por día de 4.09 horas durante la noche y 6.57 horas durante el día, a diferencia de otras áreas tales como el Dormitorio Máster y la Sala que tienen un uso esperado de sólo 0.57 horas durante la noche, y de 6.95 horas durante la noche.

En la figura 3.10, se muestra el plano del Departamento 1, en el cual es posible observar la división de las áreas de trabajo (color verde), con la respectiva ubicación de cada una de las luminarias respectivas (color púrpura).

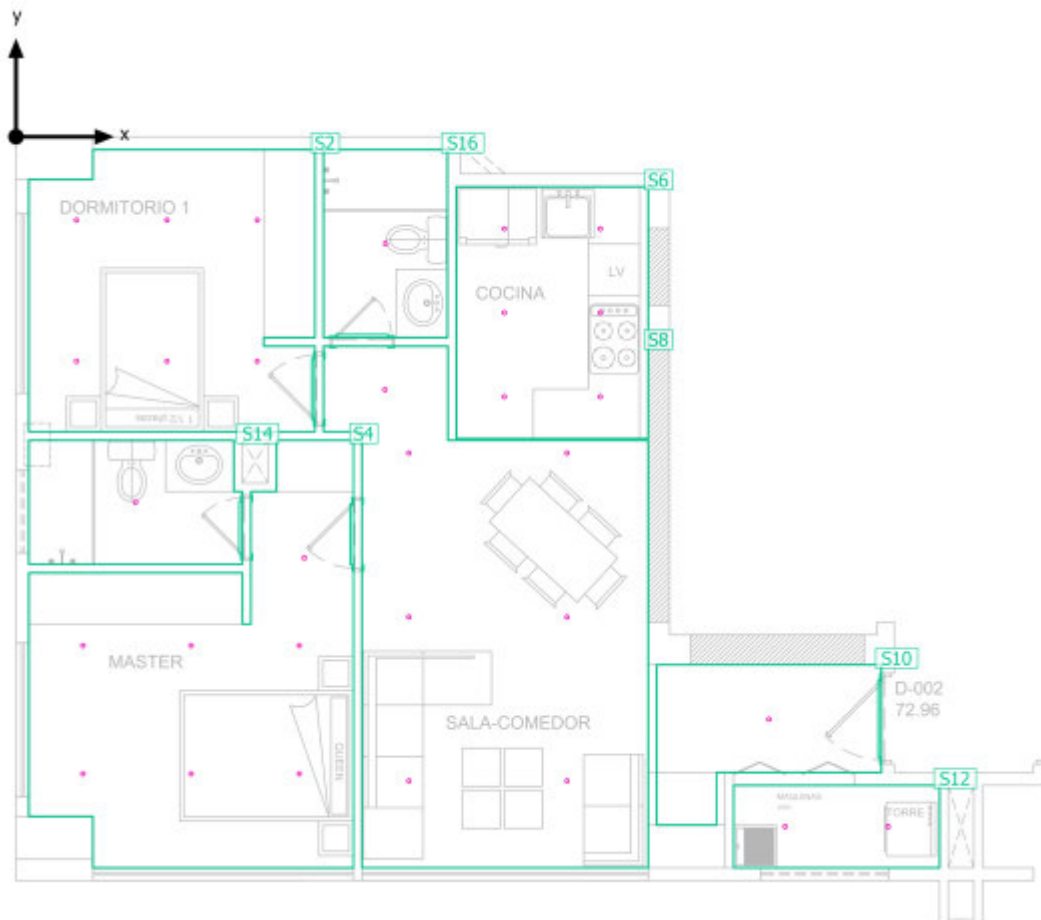


Figura 3.10. Plano del Departamento 1 con la ubicación de las luminarias en cada área de trabajo [Elaboración propia]

Para el Departamento 2, se presentan los mismos parámetros relevantes que en el caso anterior, como se observa en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resumen de resultados obtenidos en DIALux en el diseño del sistema de iluminación para el Departamento 2

Área	# Luminarias	Potencia total [W]	Nivel de Iluminación [lx]		Consumo [kWh/a]
			Calculado	Nominal	
Dormitorio Máster	9	49,5	225	≥200	86 a 140
Dormitorio 1	7	38,5	242	≥200	67 a 110
Dormitorio 2	8	44	230	≥200	76 a 120
Sala	4	22	116	≥100	42
Estar TV	1	5,5	70	≥30	11

Cocina-Comedor	14	77	323	≥ 300	300
Cuarto de Máquinas	2	11	220	≥ 200	25
Baño D. Máster	2	11	231	≥ 100	6 a 9
Baño D1	1	5,5	153	≥ 100	5
Baño D2	2	11	282	≥ 100	9
Baño Social	1	5,5	191	≥ 100	5
Balcón	1	5,5	72,5	≥ 30	11
Pasillo	1	5,5	159	≥ 30	6

De manera similar, los niveles de iluminación calculados con el software son superiores a los niveles nominales mínimos requeridos por la normativa para todas las áreas de trabajo.

En la Figura 3.11 se visualiza todas las áreas de trabajo (color verde), y la ubicación de cada una de las luminarias (color púrpura) para el Departamento 2.

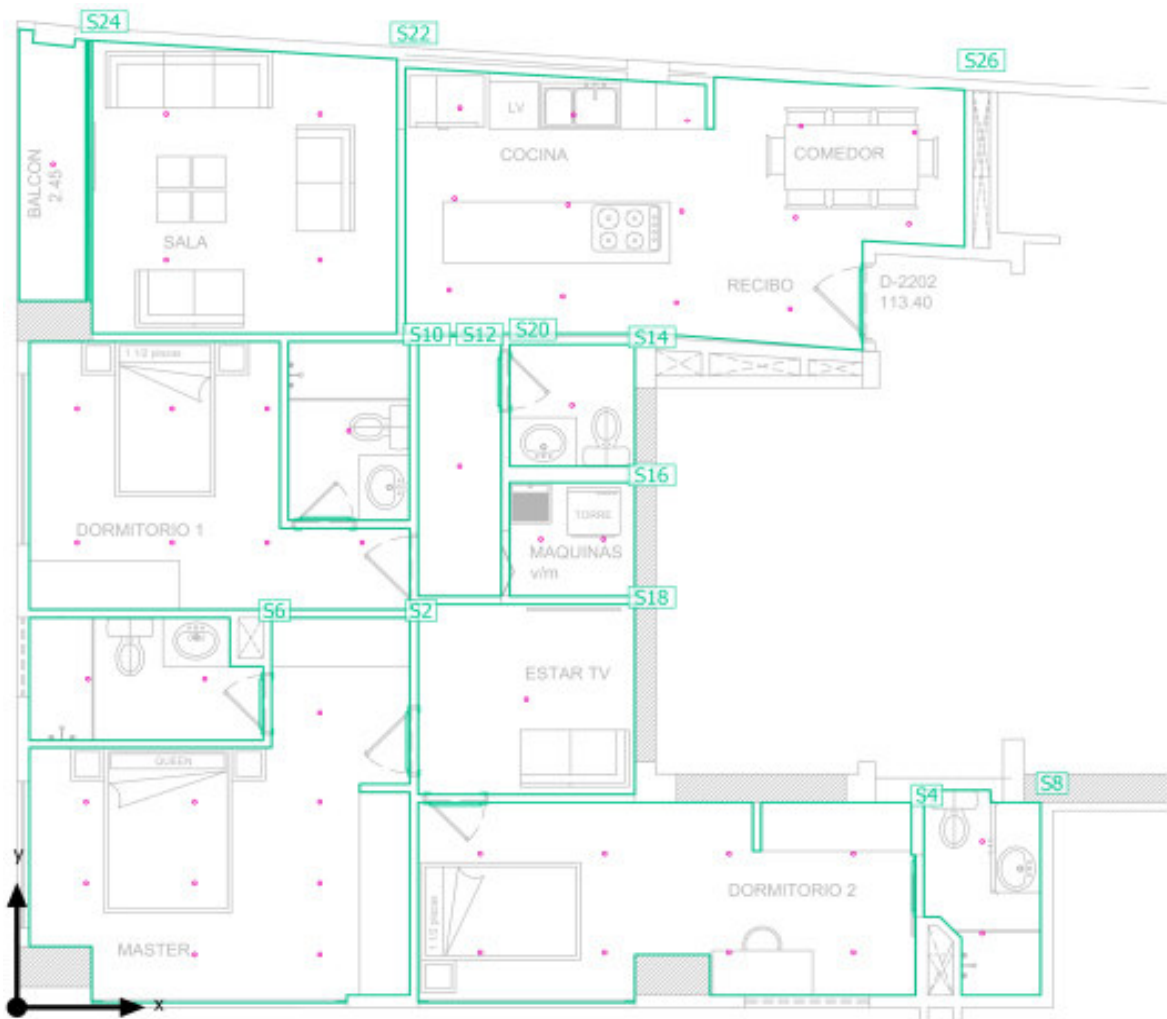


Figura 3.11. Plano del departamento 2 con la ubicación de las luminarias en cada área de trabajo [Elaboración propia]

3.1.7.1 Renderizado

El renderizado en 3D permite visualizar esto de mejor manera, así como también tiene la ventaja de mostrar las curvas isolux y los mapas de calor de cada área de trabajo.

En la Figura 3.12 se expone la imagen con la renderización en 3D del dormitorio máster del Departamento 1, en la cual se puede apreciar el área de trabajo con las texturas y colores respectivos, y con el posible mobiliario a utilizarse.



Figura 3.12. Renderizado del dormitorio máster del Departamento 1 [Elaboración propia]

En el Anexo A, se muestra el renderizado para cada una de las áreas de trabajo del Departamento 1 y del Departamento 2.

3.1.7.2 Colores falsos

Una función muy beneficiosa que presenta el software DIALux Evo es la de representar gráficamente los niveles de iluminación por medio de colores falsos. Dicha representación funciona de manera parecida a una cámara térmica, con la diferencia de que, mientras la cámara térmica representa cada nivel de temperatura por medio de un color, los colores falsos representan los niveles de iluminación por medio de colores, como se evidencia en la Figura 3.13.

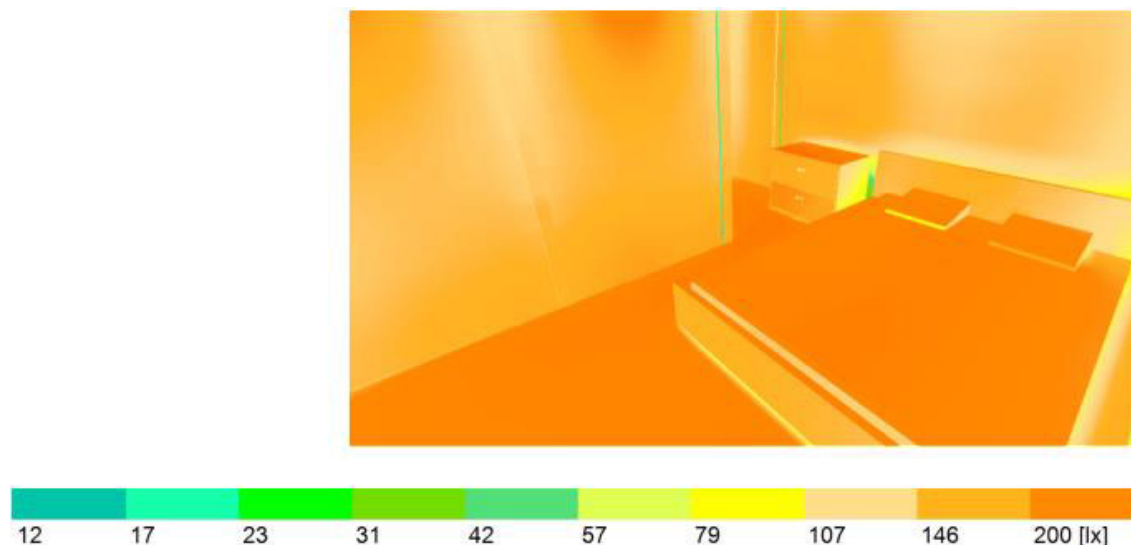


Figura 3.13. Representación por medio de colores falsos del dormitorio máster del Departamento 1 [Elaboración propia]

Todas las representaciones por medio de colores falsos vienen acompañadas de su respectiva paleta de colores, la cual especifica el color correspondiente para cada nivel de iluminación. La paleta de colores mencionada es modificable, de acuerdo con nuestras necesidades y requerimientos. Para el presente trabajo de titulación se ha establecido que para cada área de trabajo el nivel de iluminación mínimo requerido por la normativa se represente con un único color de la paleta de colores. El color seleccionado es el anaranjado, con los cual se tiene que, para el Dormitorio Máster, el cual requiere de un nivel de iluminación de 200 luxes, se establece que el color anaranjado represente los 200 luxes, como se aprecia en la paleta de colores de la figura.

Mientras que, para el caso de la Sala, se tiene que el área de trabajo requiere un nivel de iluminación de 100 luxes, por ende, se establece que el color anaranjado represente los 100 luxes mínimos requeridos, como se puede apreciar en la Figura 3.14. Esto se realiza con la finalidad de que el usuario pueda visualizar que el área de trabajo respectiva cumpla con el nivel de iluminación requerido.

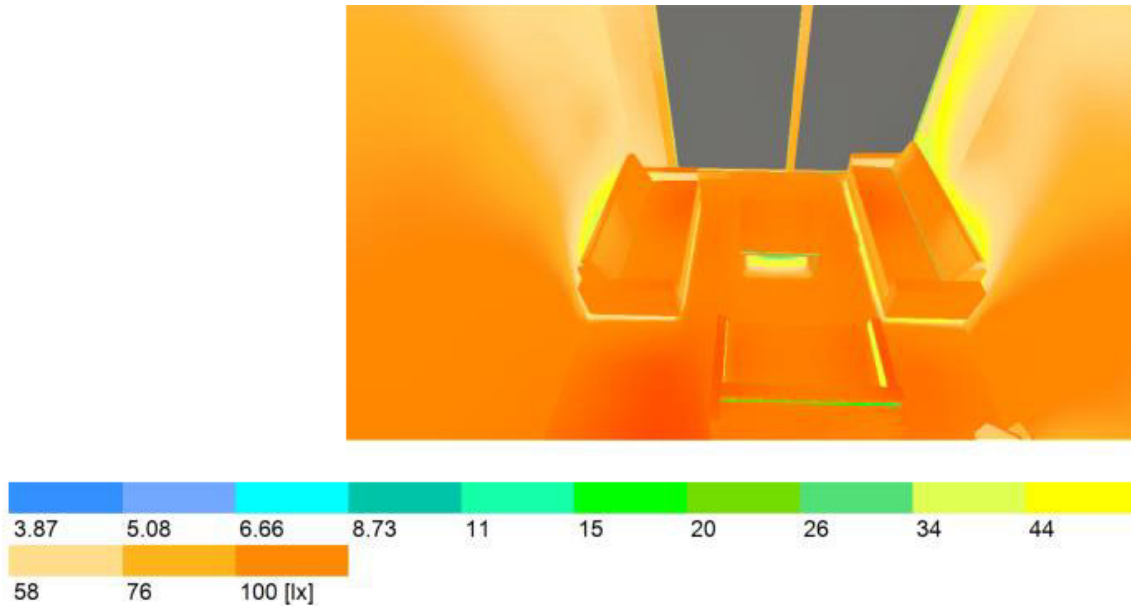


Figura 3.14. Representación por medio de colores falsos del dormitorio máster del Departamento 1 [Elaboración propia]

El Anexo B recopila la representación por medio de colores falsos de cada área de trabajo del Departamento 1 y Departamento 2.

3.1.7.3 Curvas Isolux

En la documentación también es posible presentar las curvas isolux para cada área de trabajo, las cuales muestran gráficamente el flujo luminoso que llega a cada punto de la superficie del área de trabajo, y aquellos puntos que reciben una misma cantidad de luz se unen, formando las llamadas curvas isolux. En la Figura 3.15 se muestra la curva isolux para la lavandería. Es posible observar que para esta área de trabajo existen varios puntos que reciben la misma cantidad de luz.

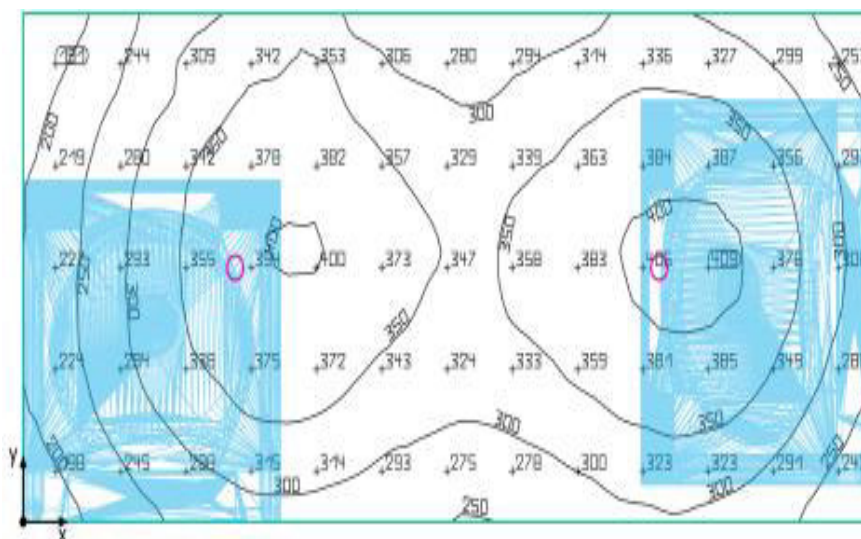


Figura 3.15. Curvas Isolux de la Lavandería [Elaboración propia]

Utilizando el software DIALux Evo se obtuvo las curvas isolux para cada área de trabajo del Departamento 1 y del Departamento 2, todas estas curvas se presentan en el Anexo C.

3.2 MEDICIÓN CONTENIDO ARMÓNICO

Las mediciones a las luminarias LED con dimerización se realizaron con los equipos y el procedimiento mencionados en la sección anterior, en el Anexo D se muestran fotografías de las luminarias sometidas a los ensayos.

3.2.1. POTENCIA MÁXIMA

En primer lugar, esto se efectuó para la luminaria B operando con su potencia máxima permitida por el interruptor de dimerización. En la Tabla 3.8, se exhiben las componentes armónicas individuales de corriente y de voltaje. Se aprecia su magnitud, así como también el porcentaje en relación con las ondas fundamentales de voltaje y corriente.

Tabla 3.8. Componentes armónicas individuales de voltaje y corriente para la luminaria B operando a potencia máxima

Orden Armónico	Ih [mA]	Ih[%]	Desfasaje [°]	Vh [V]	Vh [%]
1	66	100	-11,07	119,71	100
3	9	12,95	-123,942	5,537	4,63
5	7	10,03	-63,839	6,6804	5,58
7	7	10,81	-45,413	6,2429	5,21
9	6	8,81	-34,389	4,1399	3,46
11	4	6,01	-34,526	1,739	1,45
13	4	5,32	-64,767	1,9082	1,59
15	4	6,14	-47,808	2,7795	2,32
17	4	5,83	-28,029	2,3457	1,96
19	3	4,84	-17,143	1,1361	0,95
21	3	4,25	-62,326	0,9228	0,77
23	3	4,61	-49,653	1,6104	1,35
25	3	4,53	-26,86	1,5001	1,25
27	3	4	-14,267	0,7684	0,64
29	2	3,56	-67,941	0,6103	0,51
31	2	3,75	-55,497	1,1839	0,99
33	3	3,83	-31,65	1,2133	1,01
35	2	3,5	-16,364	0,7022	0,59
37	2	3,35	-60,516	0,5074	0,42
39	2	3,48	-56,929	0,9706	0,81
41	2	3,64	-33,002	1,0552	0,88
43	2	3,46	-16,364	0,6618	0,55
45	2	3,27	-56,597	0,4118	0,34
47	2	3,4	-59,404	0,8015	0,67
49	2	3,55	-35,993	0,9118	0,76

Los valores porcentuales del contenido armónico de corriente y de voltaje se graficaron utilizando el software computacional del analizador de calidad de energía empleado para realizar las mediciones en el presente trabajo de titulación. Las gráficas generadas para el contenido armónico porcentual de corriente y voltaje con el programa se presentan en la Figura 3.16 y Figura 3.17, respectivamente.

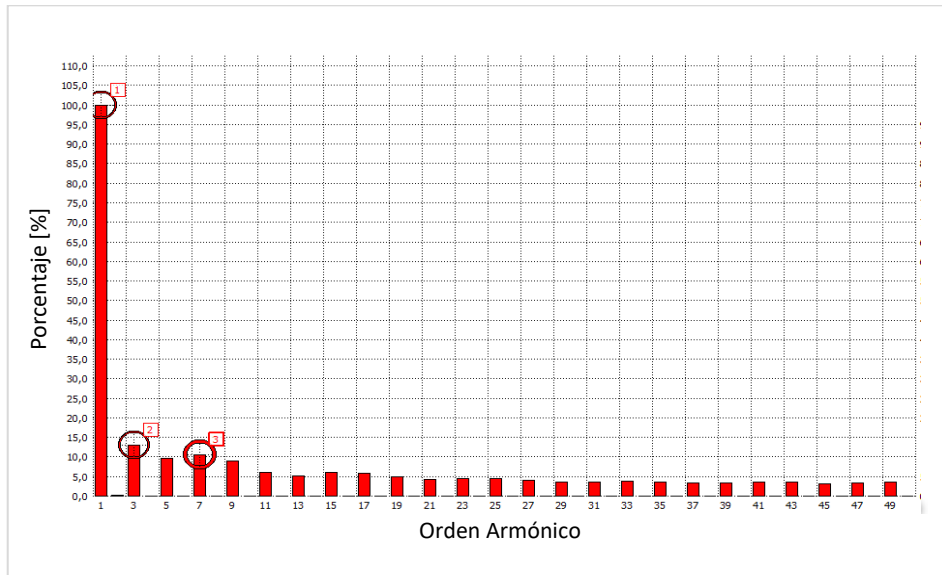


Figura 3.16. Gráfica del porcentaje de las componentes armónicas individuales de corriente para la luminaria B operando a potencia máxima [Elaboración propia]

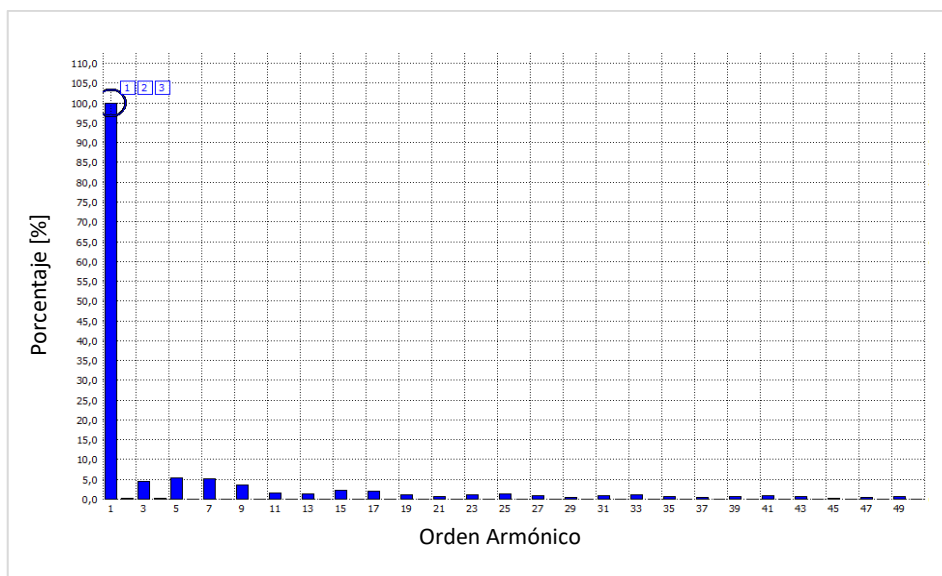


Figura 3.17. Gráfica del porcentaje de las componentes armónicas individuales de voltaje para la luminaria B operando a potencia máxima [Elaboración propia]

Como se puede notar en los valores mostrados, el porcentaje de las componentes armónicas de voltaje es bajo, sin embargo, es posible ver que las componentes armónicas de voltaje de orden 5 y 7, sobrepasan ligeramente los límites establecidos por la normativa,

la cual establece que para voltajes inferiores a 1kV el contenido armónico individual no debe superar el 5%.

Es factible apreciar también que las componentes armónicas de corriente no son desmesuradas, teniéndose que las componentes armónicas de corriente de orden 3, 5 y 7 son las más grandes, alcanzando valores porcentuales de tan sólo 12,95%, 10,03% y 10,81%, respectivamente. Para efectuar la comparativa del valor de los armónicos de corriente con la normativa, es necesario determinar el valor de las corrientes armónicas por cada vatio consumido(mA/W), debido a que, como se presentó en la Tabla 1.3 en el capítulo 1, los equipos de iluminación con potencias menores a 25W, son considerados como equipos Clase D, y sus límites de corrientes armónicas se determinan en base a esta relación. Para el caso de la luminaria B, en el presente estado dimerización se obtuvo un consumo de 8W. A continuación, en la Tabla 3.9, se presenta la comparación con los límites de corriente calculados, considerando las componentes más significativas.

Tabla 3.9. Comparativa entre las corrientes armónicas medidas y los límites establecidos por la normativa para la luminaria B operando a potencia máxima

Orden Armónico	I _h [mA]	Corriente armónica (mA/W)	Corriente armónica máxima permitida (mA/W)
1	66	-	-
3	9	1,125	3,2
5	7	0,875	1,9
7	7	0,875	1
9	6	0,75	0,5
11	4	0,5	0,35
13	4	0,5	0,30

Como se mencionó previamente, las componentes armónicas de corriente de orden 3, 5 y 7, son las de mayor magnitud, sin embargo, estas no superan los valores máximos establecidos por la normativa que fueron determinados para este caso. Por otra parte, se distingue que las componentes de orden 9, 11 y 13 superan los límites máximos. En la Figura 3.18 se exhiben todas las componentes de orden impar, en contraste con los límites establecidos por la normatividad.

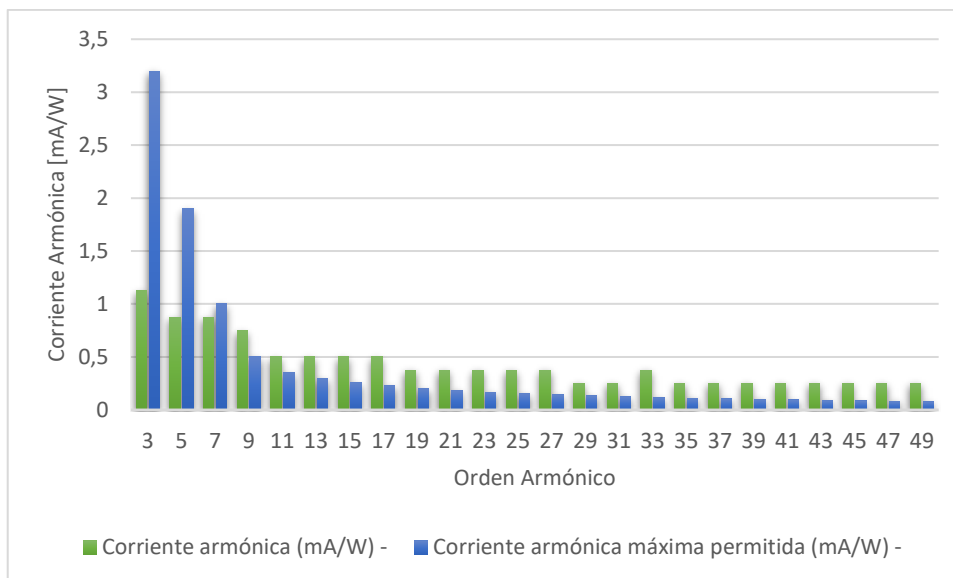


Figura 3.18. Gráfica comparativa entre las corrientes armónicas medidas y los límites establecidos por la normativa para la luminaria B operando a potencia máxima [Elaboración propia]

Se puede observar que los valores de las componentes de orden 3, 5 y 7 son inferiores a los límites máximos, no obstante, desde la componente de orden 11 en adelante se superan los valores establecidos por la normativa.

3.2.2. POTENCIA NOMINAL

Posteriormente, se realizó las mediciones para la luminaria B energizada con un estado de dimerización tal que le permita operar a potencia nominal, la cual es de 6w. En la Tabla 3.10 se exponen los resultados obtenidos.

Tabla 3.10. Componentes armónicas individuales de voltaje y corriente para la luminaria B operando a potencia nominal

Orden Armónico	Ih [mA]	Ih [%]	Desfasaje [°]	Vh [V]	Vh [%]
1	55	100	-6,566	80,88	100
3	24	43,78	-26,413	38,882	48,07
5	14	25,79	-48,896	11,357	14,04
7	15	26,26	-43,877	14,07	17,4
9	12	20,81	-50,982	6,1824	7,64
11	12	22,61	-46,73	8,8867	10,99
13	10	18,74	-55,141	4,3605	5,39
15	11	20,23	-43,098	6,5422	8,09
17	10	17,28	-58,808	3,5495	4,39
19	10	18,22	-38,067	4,9973	6,18
21	9	15,82	-61,444	3,1897	3,94
23	9	16,4	-33,048	3,8893	4,81
25	8	14,6	-61,295	3,0098	3,72

27	8	14,98	-29,324	3,0469	3,77
29	8	13,7	-59,255	2,9241	3,62
31	8	13,8	-27,319	2,3844	2,95
33	7	13,13	-55,783	2,8585	3,53
35	7	13,12	-28,579	1,8933	2,34
37	7	12,8	-51,475	2,8014	3,46
39	7	12,66	-33,908	1,542	1,91
41	7	12,77	-46,559	2,73	3,38
43	7	12,43	-43,831	1,3536	1,67
45	7	12,68	-41,333	2,5872	3,2
47	7	12,22	-54,66	1,325	1,64
49	7	12,66	-36,142	2,3959	2,96

De igual manera, los valores porcentuales de las componentes armónicas de corriente y voltaje fueron graficadas y se presentan en la Figura 3.19 y Figura 3.20, respectivamente.

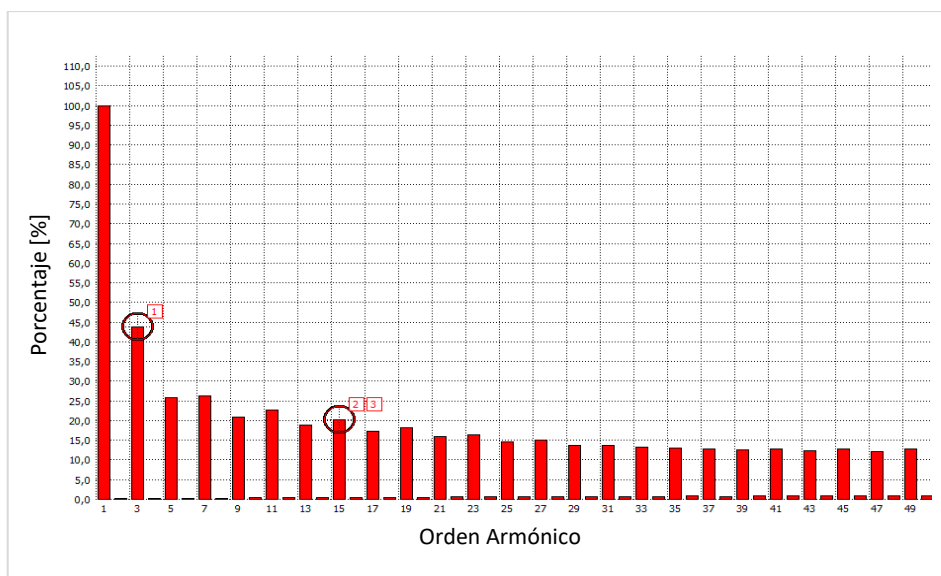


Figura 3.19. Gráfica del porcentaje de las componentes armónicas individuales de corriente para la luminaria B operando a potencia nominal [Elaboración propia]

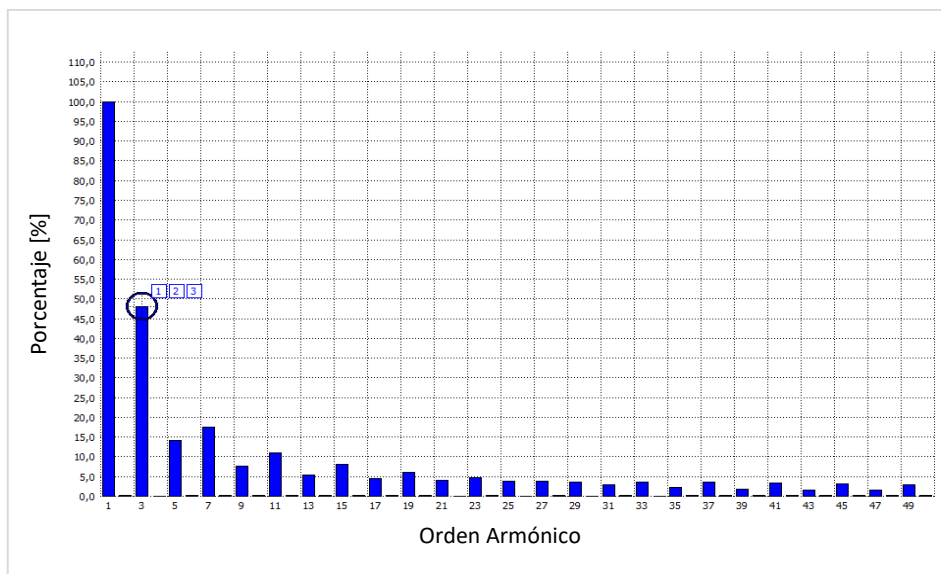


Figura 3.20. Gráfica del porcentaje de las componentes armónicas individuales de voltaje para la luminaria B operando a potencia nominal [Elaboración propia]

Observando el porcentaje del contenido armónico de voltaje, se nota que se excede enormemente el límite establecido por la normativa del 5%, logrando valores incluso del 48,07% para el armónico de voltaje de orden 3. De manera similar se presenta un exceso considerable en las componentes de orden 5 y 7, logrando valores del 14,04% y 17,4%, respectivamente.

Por otro lado, el contenido armónico de corriente necesita compararse con el valor de corriente armónica máxima permitida establecida por la normativa para cada componente. Para este caso la potencia activa es de 6 vatios, la comparativa de las componentes más significativas con la normatividad se expone a continuación en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Comparativa entre las corrientes armónicas medidas y los límites establecidos por la normativa para la luminaria B operando a potencia nominal

Orden Armónico	I _h [mA]	Corriente armónica (mA/W)	Corriente armónica máxima permitida (mA/W)
1	55	-	-
3	24	4,00	3,2
5	14	2,33	1,9
7	15	2,50	1
9	12	2,00	0,5
11	12	2,00	0,35
13	10	1,67	0,30

Como se puede apreciar, todas las componentes armónicas impares de corriente superan el valor de corriente armónica máxima permitida por la normativa siendo el caso más crítico el de la componente de orden 3, ya que presenta una magnitud de 24mA. Para observar esto de mejor manera, se presenta la respectiva gráfica comparativa en la Figura 3.21.

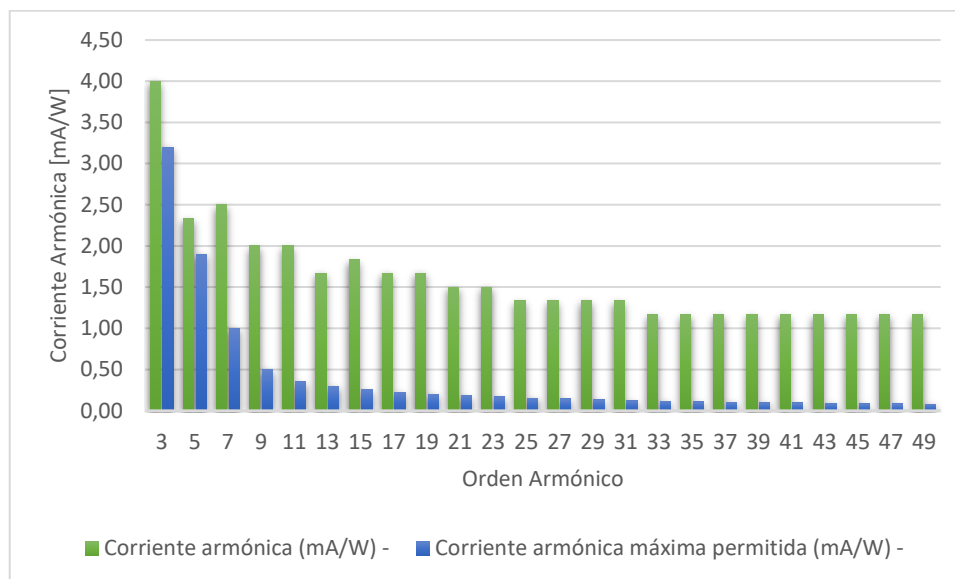


Figura 3.21. Gráfica comparativa entre las corrientes armónicas medidas y los límites establecidos por la normativa para la luminaria B operando a potencia nominal [Elaboración propia]

Se aprecia claramente como todas las componentes armónicas de corriente superan los valores establecidos por la normativa, excediendo aún más aquellas componentes de orden mayor.

3.2.3. POTENCIA MÍNIMA

Para finalizar con los ensayos de esta luminaria, se realizaron las mediciones con un estado de dimerización que permita la operación de esta a una potencia mínima, la cual fue de 2 vatios. Los resultados se evidencian en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Componentes armónicas individuales de voltaje y corriente para la luminaria B operando a potencia mínima

Orden Armónico	Ih [mA]	Ih [%]	Desfasaje [°]	Vh [V]	Vh [%]
1	26	100	-2,704	31,591	100
3	22	82,73	-15,917	25,763	81,55
5	15	57,77	-30,046	17,886	56,62
7	10	37,35	-53,881	9,8394	31,15
9	9	34,92	-54,167	4,8576	15,38
11	10	39,19	-34,183	5,864	18,56
13	10	37,66	-41,631	6,4877	20,54

15	8	32,16	-57,834	4,9034	15,52
17	8	29,62	-57,88	2,7502	8,71
19	8	30,78	-30,516	3,0266	9,58
21	8	30,48	-35,993	3,9517	12,51
23	7	27,52	-53,09	3,4995	11,08
25	7	25,21	-61,593	2,0837	6,6
27	7	25,44	-29,714	1,8325	5,8
29	7	25,67	-29,679	2,7621	8,74
31	6	24,14	-47,957	2,8123	8,9
33	6	22,48	-63,3	1,8606	5,89
35	6	22,58	-35,5	1,2695	4,02
37	6	23,21	-25,107	2,0867	6,61
39	6	22,63	-42,8	2,4295	7,69
41	6	21,45	-62,12	1,8295	5,79
43	6	21,34	-47,59	1,0419	3,3
45	6	22,01	-22,311	1,599	5,06
47	6	21,95	-37,174	2,134	6,75
49	6	21,04	-58,465	1,8325	5,8

Asimismo, las tablas que exhiben los valores de componentes armónicas para el resto de las luminarias sometidas a ensayos se presentan en el Anexo E.

Del mismo modo que en los estados de dimerización previos, los valores porcentuales de voltaje y corriente se grafican para visualizar de mejor manera la dimensión del contenido armónico medido. La Figura 3.22 y la Figura 3.23 ilustran los porcentajes del contenido armónico de corriente y de voltaje, respectivamente.

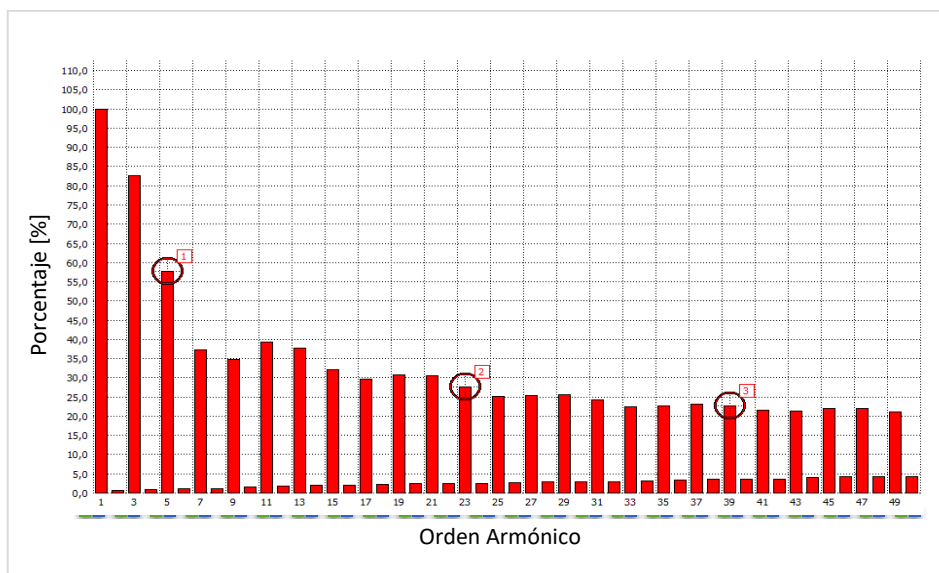


Figura 3.22. Gráfica del porcentaje de las componentes armónicas individuales de corriente para la luminaria B operando a potencia mínima [Elaboración propia]

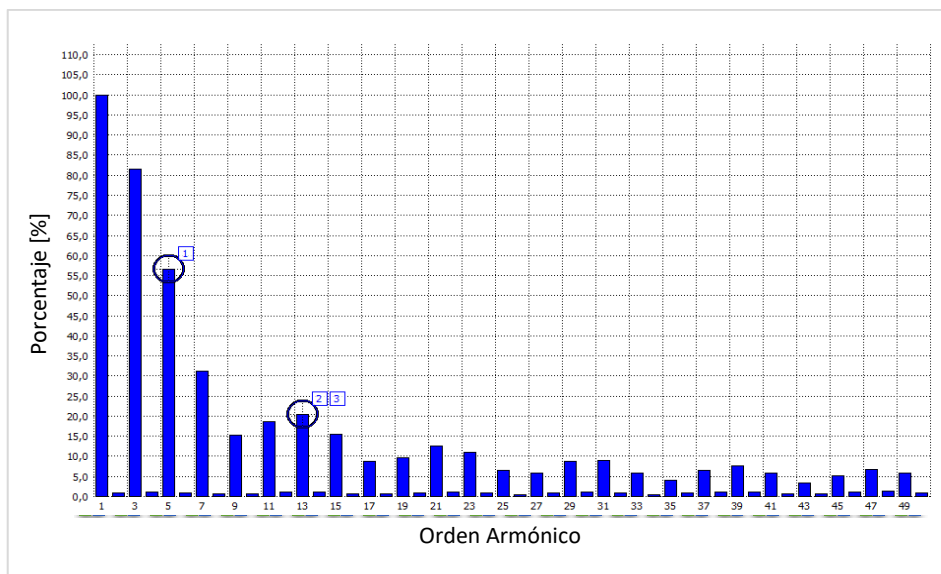


Figura 3.23. Gráfica del porcentaje de las componentes armónicas individuales de voltaje para la luminaria B operando a potencia mínima [Elaboración propia]

Como se puede fijar existe un aumento considerable en las componentes armónicas de voltaje, superando sobradamente el límite del 5% permitido, teniendo una componente armónica de orden 3 desmedida, con un valor del 81,55%. De modo similar las componentes de orden 5 y 7 alcanzan valores altos del 56,62% y 31,15%, respectivamente, lo cual es inquietante.

Lo mismo ocurre con las componentes armónicas de corriente, logrando magnitudes superiores al 20% en todas las componentes impares, siendo la componente de orden 3 la más grande, misma que presenta un valor del 82,73%.

En la Tabla 3.13 se expone la comparativa de las componentes más representativas con la corriente armónica máxima permitida por la normativa.

Tabla 3.13. Comparativa entre las corrientes armónicas medidas y los límites establecidos por la normativa para la luminaria B operando a potencia mínima

Orden Armónico	I_h [mA]	Corriente armónica (mA/W)	Corriente armónica máxima permitida (mA/W)
1	26	-	-
3	22	11	3,2
5	15	7,5	1,9
7	10	5	1
9	9	4,5	0,5
11	10	5	0,35
13	10	5	0,30

Como se aprecia en la Tabla 3.13, todas las componentes armónicas de corriente superan enormemente las corrientes máximas permitidas por la normativa para cada componente. En la Figura 3.24, se puede examinar de forma visual la excedencia de dichos límites.

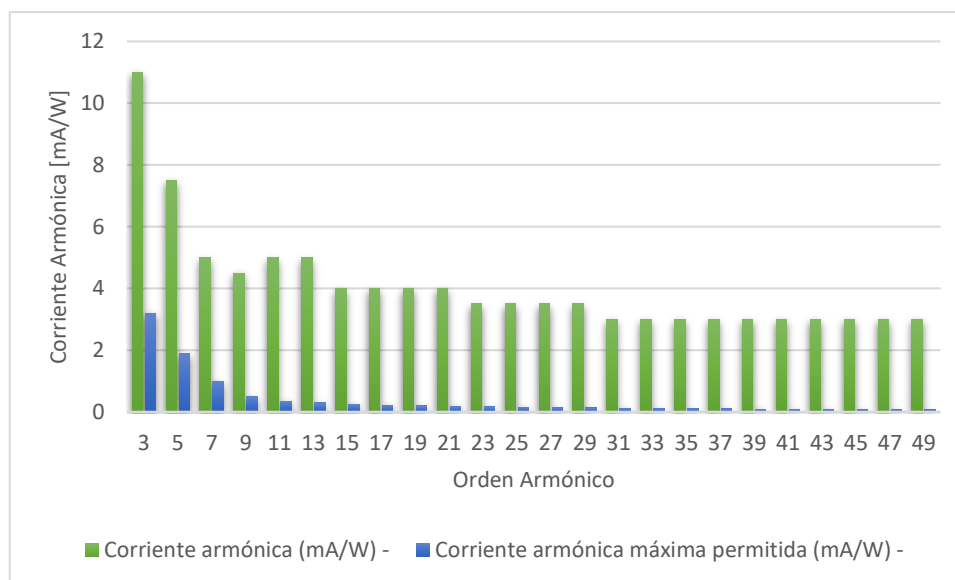


Figura 3.24. Gráfica comparativa entre las corrientes armónicas medidas y los límites establecidos por la normativa para la luminaria B operando a potencia mínima [Elaboración propia]

En este caso los límites establecidos por la normativa son superados en demasía, con lo cual se tiene una inyección de corrientes armónicas significativas que podrían provocar un impacto negativo considerable en la red eléctrica.

3.2.4. COMPARATIVA ENTRE LOS TRES ESTADOS DE DIMERIZACIÓN

Para finalizar con el análisis de las mediciones realizadas a la luminaria B, se presenta una comparativa entre los valores obtenidos para los tres estados de dimerización, con los que se obtuvo potencias de operación de 8W, 6W, y 2W. En primer lugar, se presentan los valores porcentuales del contenido armónico de corriente en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Comparativa entre los porcentajes de las componentes armónicas individuales de corriente para tres estados de dimerización diferentes de la luminaria B

Orden Armónico	Potencia 8W Ih [%]	Potencia 6W Ih [%]	Potencia 2W Ih [%]
1	100	100	100
3	12,95	43,78	82,73
5	10,03	25,79	57,77
7	10,81	26,26	37,35
9	8,81	20,81	34,92
11	6,01	22,61	39,19
13	5,32	18,74	37,66
15	6,14	20,23	32,16

17	5,83	17,28	29,62
19	4,84	18,22	30,78
21	4,25	15,82	30,48
23	4,61	16,4	27,52
25	4,53	14,6	25,21
27	4	14,98	25,44
29	3,56	13,7	25,67
31	3,75	13,8	24,14
33	3,83	13,13	22,48
35	3,5	13,12	22,58
37	3,35	12,8	23,21
39	3,48	12,66	22,63
41	3,64	12,77	21,45
43	3,46	12,43	21,34
45	3,27	12,68	22,01
47	3,4	12,22	21,95
49	3,55	12,66	21,04

Se observa claramente el incremento significativo del porcentaje del contenido armónico de corriente al realizar la dimerización, esto es debido a que, para reducir el flujo luminoso, se necesita disminuir la potencia, y esto se logra mediante el recorte de la onda de voltaje. A mayor dimerización existe un mayor recorte de la onda, lo que incide en las corrientes armónicas, incrementándolas. Para apreciar de mejor manera la influencia de la dimerización en el valor porcentual del contenido armónico de corriente, se graficaron dichos valores para los tres estados de dimerización estudiados, y se presenta el resultado en la Figura 3.25. Es notorio que el contenido armónico de corriente es superior cuando existe una mayor dimerización. Esto se observa en cada una de las componentes armónicas impares.

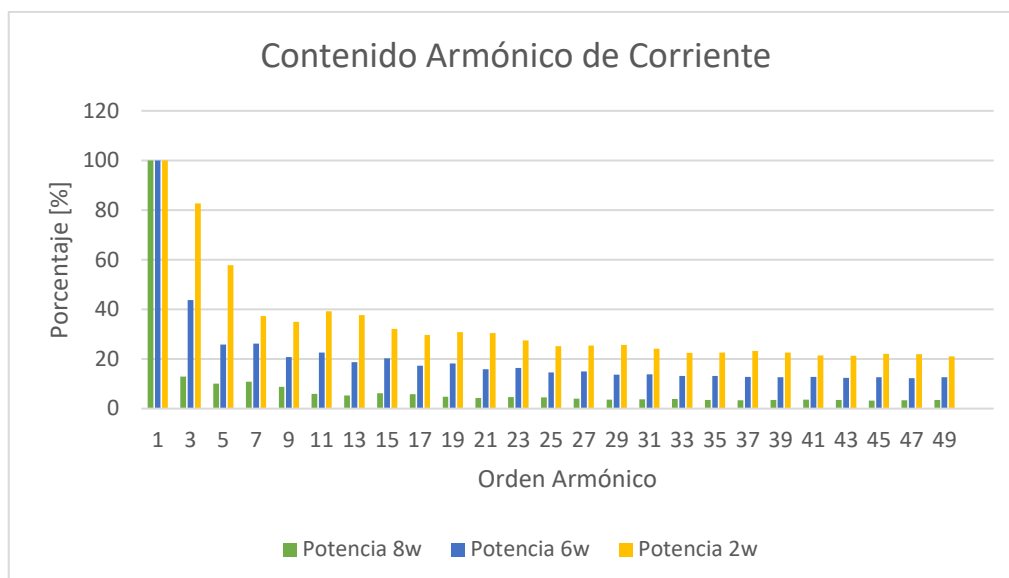


Figura 3.25. Gráfica comparativa entre los porcentajes de las componentes armónicas individuales de corriente para tres estados de dimerización diferentes de la luminaria B [Elaboración propia]

El Anexo F muestra las gráficas comparativas de las componentes armónicas de corriente para el resto de las luminarias sometidas a los ensayos.

De manera similar, en la Tabla 3.15, se exhiben los valores porcentuales del contenido armónico de voltaje para los tres estados de dimerización analizados. Es posible notar que, de modo semejante a las componentes armónicas de corriente, las componentes de voltaje también experimentan un incremento considerable al ser sometidas al proceso de dimerización.

Tabla 3.15. Comparativa entre los porcentajes de las componentes armónicas individuales de voltaje para tres estados de dimerización diferentes de la luminaria B

Orden Armónico	Potencia 8w	Potencia 6w	Potencia 2w
	Vh [%]	Vh [%]	Vh [%]
1	100	100	100
3	4,63	48,07	81,55
5	5,58	14,04	56,62
7	5,21	17,4	31,15
9	3,46	7,64	15,38
11	1,45	10,99	18,56
13	1,59	5,39	20,54
15	2,32	8,09	15,52
17	1,96	4,39	8,71
19	0,95	6,18	9,58
21	0,77	3,94	12,51
23	1,35	4,81	11,08
25	1,25	3,72	6,6
27	0,64	3,77	5,8
29	0,51	3,62	8,74
31	0,99	2,95	8,9

33	1,01	3,53	5,89
35	0,59	2,34	4,02
37	0,42	3,46	6,61
39	0,81	1,91	7,69
41	0,88	3,38	5,79
43	0,55	1,67	3,3
45	0,34	3,2	5,06
47	0,67	1,64	6,75
49	0,76	2,96	5,8

Utilizando los valores de la Tabla 3.15, se graficó todas estas componentes para apreciar de mejor manera el incremento del valor porcentual del contenido armónico de voltaje al presentarse una mayor dimerización, como se aprecia en la Figura 3.26.

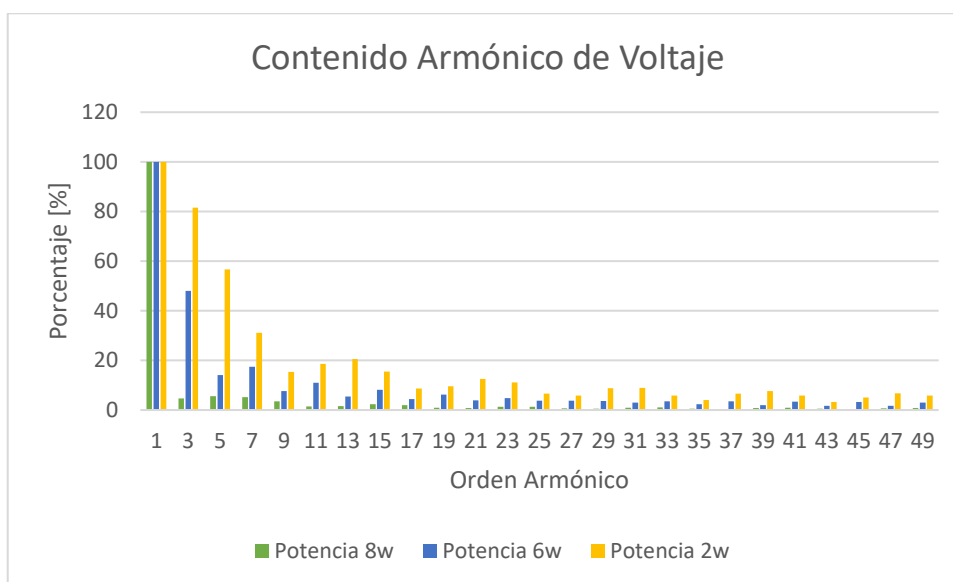


Figura 3.26. Gráfica comparativa entre los porcentajes de las componentes armónicas individuales de voltaje para tres estados de dimerización diferentes de la luminaria B [Elaboración propia]

Asimismo, en la Tabla 3.16, se muestran los resultados de los valores representativos de la luminaria B obtenidos en las mediciones para los tres estados dimerización.

Tabla 3.16. Sumario de resultados obtenidos en las mediciones para la luminaria B

	Potencia Activa P [W]	Potencia Reactiva Q [var]	Potencia de Distorsión [VA]	Potencia Aparente S [VA]	Factor de Potencia PF	Voltaje [V]	Corriente [mA]	THD V [%]	THD I [%]
Pmáx	8	2	3	8	0,94	120,43	69	10,7	27,85
Pnom	6	1	6	7	0,83	93,479	79	57,14	87,27
Pmín	2	0	3	3	0,78	48,257	55	113,7	158,2

Se puede observar que la dimerización no sólo afecta al contenido armónico de voltaje y de corriente, sino que también provoca un impacto en el factor de potencia, causando una disminución de este ante la presencia del aminoramiento del flujo luminoso, ocasionado por el recorte de la onda de voltaje.

Del mismo modo que se obtuvo el sumario de resultados para la luminaria B, se presentan los valores para el resto de las luminarias en su totalidad en el Anexo G.

3.2.5. COMPARATIVA ENTRE TODAS LAS LUMINARIAS

A continuación, se expone en la Tabla 3.17, el resumen del contenido armónico medido en cada una de las luminarias para sus respectivos estados de dimerización.

Tabla 3.17. Comparativa General

Luminaria	Potencia		FP	Armónico %					THD
				Fund.	3er	5to	7mo	9no	
LUMINARIA A	Pmáx	8	0,97	100	17,2	24,95	1,03	12,82	36,91
	Pnom	6	0,96	100	44,93	9,37	19,42	2,03	54,97
	Pmín	3	0,97	100	76,98	42,18	7,98	14,2	95,6
LUMINARIA B	Pmáx	8	0,94	100	12,95	10,03	10,81	8,81	27,85
	Pnom	6	0,83	100	43,78	25,79	26,26	20,81	87,27
	Pmín	2	0,78	100	82,73	57,77	37,35	34,92	158,2
LUMINARIA C	Pnom	6	0,91	100	45,55	11,31	26,77	10,95	71,76
	Pmín	2	0,9	100	86,35	64,66	39,5	19,19	135,48
LUMINARIA D	Pmáx	7	0,95	100	15,62	8,42	12,84	8,06	27,96
	Pnom	6	0,92	100	11,13	11,34	10,47	6,15	25,97
	Pmín	2	0,81	100	14,03	9,1	12,37	7	45,27
LUMINARIA E	Pmáx	10	0,91	100	31,59	8,73	9,78	12,04	41,55
	Pnom	8	0,84	100	12,77	33,66	14,62	21,19	68,92
	Pmín	3	0,84	100	76,33	41,44	19,28	29,01	131,24
LUMINARIA F	Pmáx	6	0,95	100	30,88	22,97	17,4	11,12	49,15
	Pnom	5	0,94	100	69,63	36,33	20,44	17,02	90,85
	Pmín	3	0,86	100	85,28	67,69	54,12	47,61	149,72

Primeramente, es importante analizar los resultados del factor de potencia, de manera general se puede notar que, al realizar la dimerización mediante el recorte de la onda de voltaje, el factor de potencia disminuye, lo cual significa que existe un mayor desfase entre la onda de voltaje y la onda de corriente. Sin embargo, es posible ver una excepción para el caso de la luminaria A, el factor de potencia no se ve afectado por el recorte de la onda de voltaje, lo cual viene a ser una ventaja de esta luminaria, ya que cuando se tiene

un bajo factor de potencia es necesario realizar la corrección de este para evitar posibles penalizaciones.

En segundo lugar, es interesante examinar los valores del contenido armónico que inyecta cada luminaria obtenidos a partir de las mediciones, en los cuales se aprecia que, al haber un mayor recorte de la onda de voltaje causado por la dimerización, el porcentaje de las componentes armónicas individuales impares de corriente aumentan su valor, ocasionando que la distorsión armónica de corriente total experimente un incremento. El porcentaje de elevación de la distorsión armónica de corriente varía de una luminaria a otra, esto se debe a que cada fabricante construye las luminarias con diseños y componentes distintos. En los resultados se visualiza que existen luminarias en las que la distorsión armónica de corriente puede alcanzar valores desmedidos, como en el caso de la luminaria B operando a potencia mínima, la cual logra un porcentaje del THD del 158,2%, por otro lado, la luminaria D operando a potencia mínima consigue un valor de THD de tan sólo el 45%.

3.2.6. MEDICIÓN PARA EL DISPOSITIVO DE DIMERIZACIÓN

Para analizar el impacto provocado por el dispositivo de dimerización en la emisión de armónicos de corriente total, se ha realizado mediciones con el dispositivo energizando una lámpara incandescente. La lámpara incandescente basa su funcionamiento en el calentamiento de un conductor eléctrico para la emisión de luz, por lo cual no está constituida por elementos no lineales. Debido a esto, las luminarias incandescentes no inyectan corrientes armónicas.

Las mediciones se realizaron para varios valores de voltaje, mismos que fueron controlados con el dispositivo de dimerización. Los resultados respectivos se muestran a continuación en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Distorsión armónica total de corriente ante la variación del voltaje de energización

Voltaje [V]	THD I [%]
120	8,25
115	23,33
110	33,24
105	39,83
100	45,91
95	51,29
90	57,86
85	63,11
80	67,67
75	73,83

70	78,47
65	85,36
60	88,66
55	95,28
50	102,4
45	109
40	116,33
35	126,07
30	133,24

Como se aprecia en la Tabla, la distorsión armónica total de corriente incrementa cuando se reduce el voltaje mediante el funcionamiento del dispositivo de dimerización. Con los valores expuestos, se observa que el dispositivo de dimerización si inyecta armónicos por sí solo. Para ilustrar de mejor manera la relación entre la distorsión armónica total de corriente, y el porcentaje de dimerización, se han graficado sus valores y se presentan en la Figura. En la Figura 3.27 se observa claramente la afectación que experimenta la distorsión armónica total de corriente. El THD es directamente proporcional al porcentaje de dimerización del dispositivo.

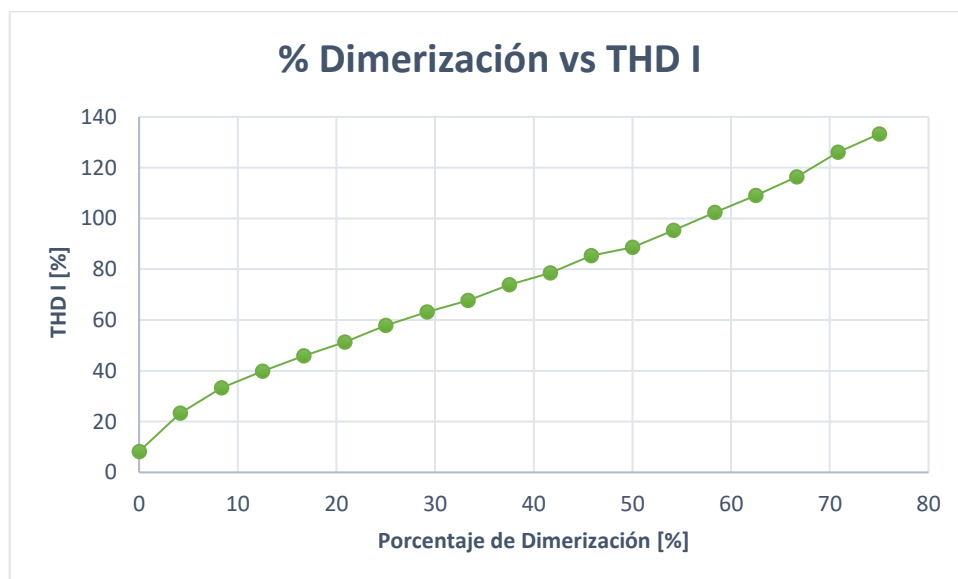


Figura 3.27.Distorsión armónica total de corriente en función del porcentaje de dimerización [Elaboración propia]

3.2.7. MEDICIÓN EN PARALELO

Como ensayos adicionales, se llevó a cabo medidas del contenido armónico para luminarias B conectadas en paralelo. Mediciones que fueron realizadas a potencia nominal.

En la Tabla 3.19, se puede apreciar que el conectar más luminarias en paralelo, la magnitud de las corrientes armónicas se incrementa. Esto se debe a que cada luminaria funciona

como una fuente de corrientes armónicas, y, al conectar fuentes de corriente en paralelo, los valores de corriente se suman provocando un incremento.

Tabla 3.19. Medición Luminarias conectadas en paralelo

Orden Armónico	Corrientes Armónicas [mA]	
	1 luminaria	2 luminarias
1	55	98
3	24	40
5	14	17
7	15	27
9	12	23
11	12	22
13	10	18
15	11	20
17	10	18
19	10	18
21	9	16
23	9	16
25	8	15
27	8	15
29	8	15
31	8	15
33	7	12
35	7	13
37	7	13
39	7	13
41	7	13
43	7	13
45	7	13
47	7	13
49	7	13

3.2.8. FORMAS DE ONDA DE VOLTAJE Y CORRIENTE

Utilizando el analizador de armónicos se capturó las formas de onda de voltaje y corriente para que una de las luminarias estudiadas. Esto se realizó para distintos estados de dimerización para poder observar el recorte en la onda de voltaje debido a la dimerización, y la afectación en la forma de onda de corriente consumida por la carga. A continuación, se muestran las formas de onda medidas en la luminaria E, la cual tiene una potencia nominal de 8W.

3.2.7.1. Potencia Máxima

En la Figura 3.28 se ilustra la forma de onda de voltaje de la luminaria E operando a potencia máxima, como se puede apreciar, el recorte en la onda de voltaje es mínima porque se energiza a la luminaria a su máxima potencia.

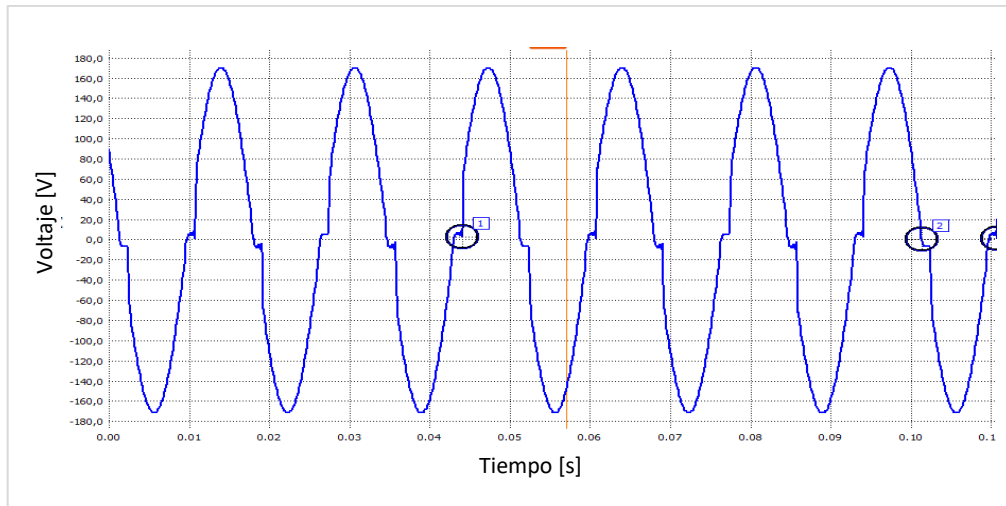


Figura 3.28. Forma de onda de voltaje de la luminaria E operando a potencia máxima [Elaboración propia]

En la Figura 3.29 se presenta la forma de onda de corriente de la luminaria E, se visualiza que la corriente tiene una forma de onda sumamente distorsionada, ocasionada por lo componentes no lineales de la luminaria LED con dimerización. Si se tuviera conectada una carga lineal, como un foco incandescente, la forma de onda de corriente luciría de manera similar a la onda de voltaje, pero al ser una carga ni lineal, que consume una corriente no lineal, la onda se distorsiona considerablemente.

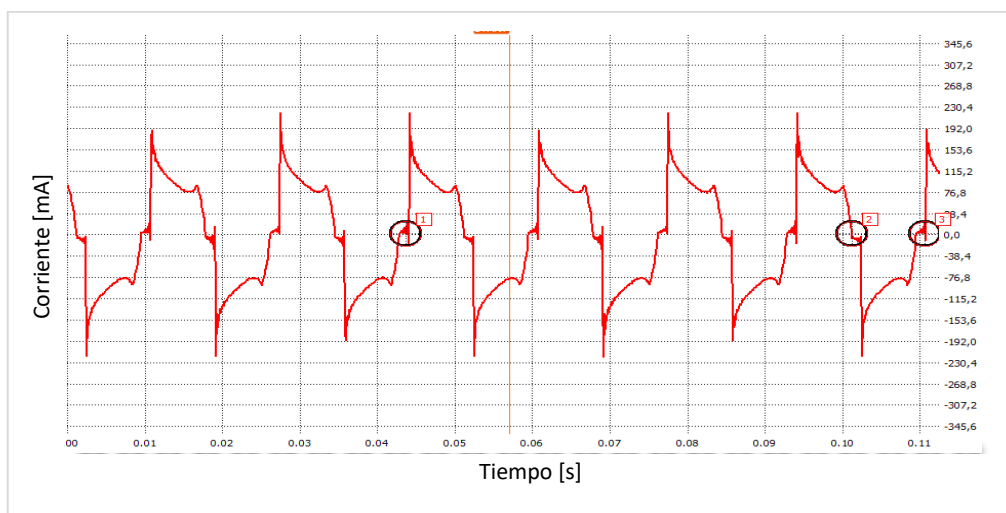


Figura 3.29. Forma de onda de corriente de la luminaria E operando a potencia máxima [Elaboración propia]

3.2.7.2. Potencia Nominal

De igual manera, se presenta la forma de onda de voltaje para la luminaria operando a potencia nominal en la Figura 3.30. Como es posible visualizar, la onda se encuentra recortada. Nótese, sin embargo, que los valores pico de la onda de voltaje tanto para potencia máxima como para potencia nominal se mantienen. El recorte en la onda se debe

a la actuación del interruptor de dimerización, el cual recorta la onda para reducir el valor RMS del voltaje, lo que permite operar a una menor potencia, consecuentemente la luminaria entrega un menor valor del flujo luminoso.

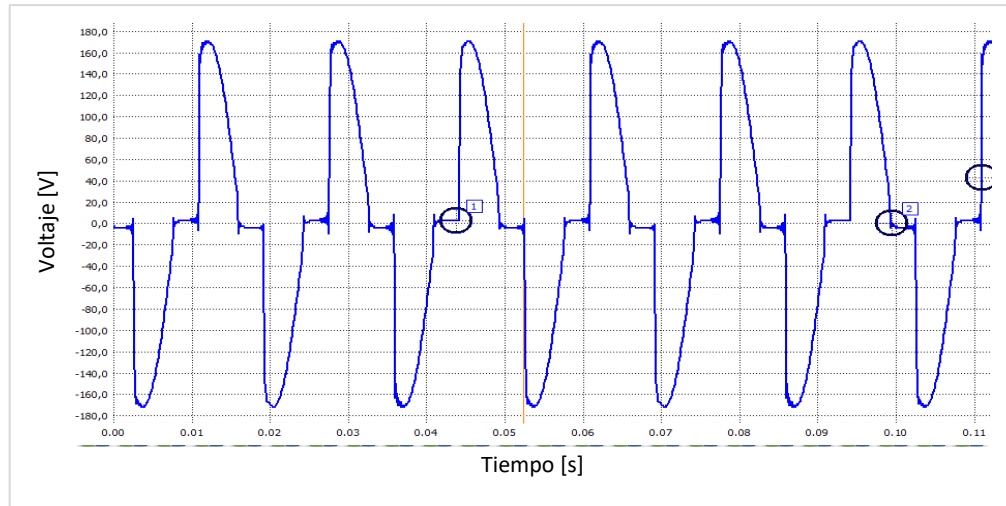


Figura 3.30. Forma de onda de voltaje de la luminaria E operando a potencia nominal [Elaboración propia]

Asimismo, en la Figura 3.31 se exhibe la forma de onda de corriente para la luminaria operando a potencia nominal, se puede notar claramente como su forma de onda se encuentra aún más distorsionada. Y, además es importante analizar los picos máximos de corriente que se tienen para este caso, los cuales alcanzan valores de 460 mA, esto es aproximadamente el doble del valor obtenido cuando la luminaria opera a potencia máxima, el cual es de tan sólo 230 mA.

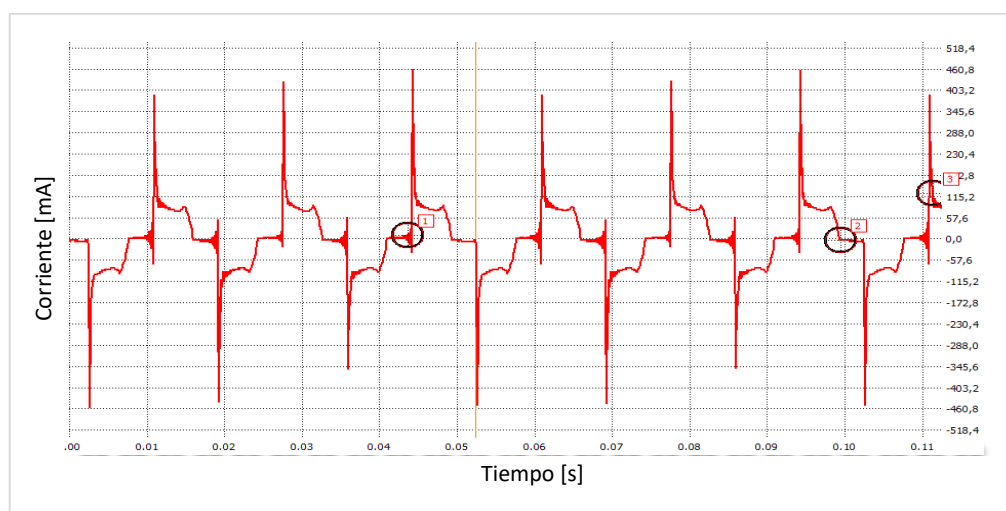


Figura 3.31. Forma de onda de corriente de la luminaria E operando a potencia nominal [Elaboración propia]

3.2.7.3. Potencia Mínima

Finalmente, se muestran las formas de onda para la luminaria operando a potencia mínima. La Figura 3.32 exhibe la forma de onda de voltaje, se visualiza que la onda se encuentra recortada con un ángulo mayor a 90° , lo que ocasiona que los valores pico no sean los mismos que se obtuvieron para potencia máxima y nominal.

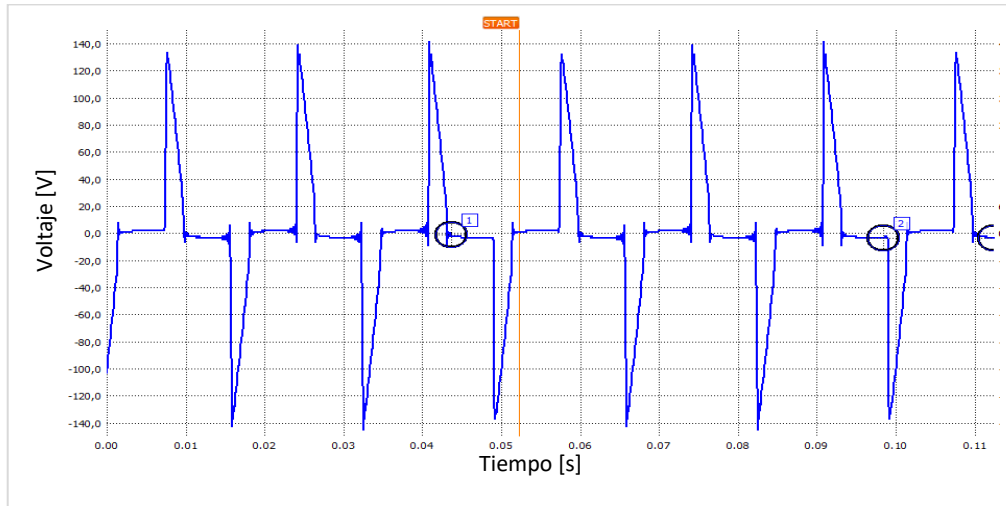


Figura 3.32. Forma de onda de voltaje de la luminaria E operando a potencia mínima [Elaboración propia]

A continuación, en la Figura 3.33 se observa la forma de onda de corriente, de igual manera se visualiza que se encuentra con un mayor grado de distorsión. Lejos de ser sinusoidal, la forma de onda luce más bien como un impulso. Con respecto a los valores pico, se aprecia que tiene un valor mayor que al obtenido en potencia máxima, sin embargo, el valor pico es ligeramente menor al medido en potencia nominal a pesar de que los valores porcentuales individuales de las componentes armónicas son mayores. Esto se debe a que, si bien los valores porcentuales individuales de las componentes son mayores, la magnitud de la componente fundamental es menor, a causa de la energización de la luminaria con un voltaje menor.

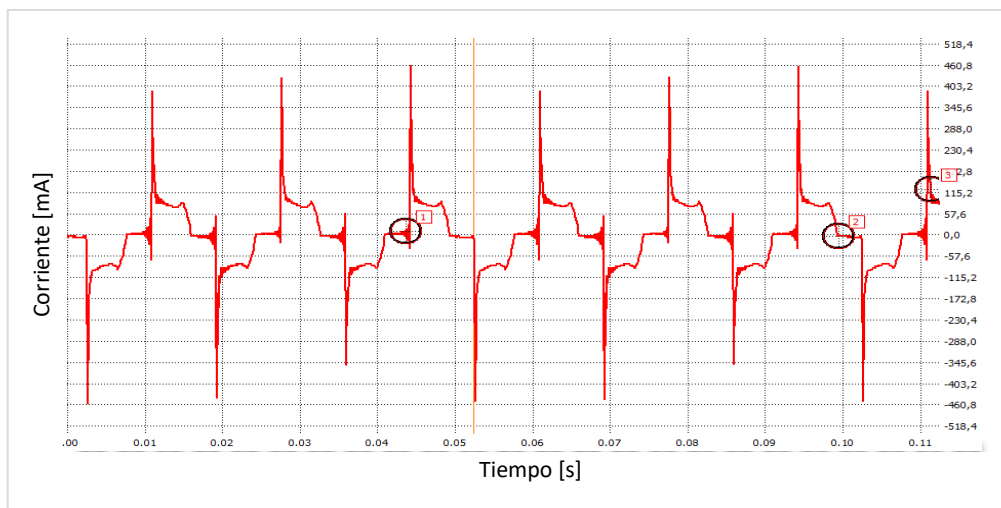


Figura 3.33. Forma de onda de corriente de la luminaria E operando a potencia mínima
[Elaboración propia]

En el Anexo H se presentan las formas de onda de voltaje y corriente para el resto de las luminarias que fueron sometidas a los ensayos de laboratorio.

3.3 MITIGACIÓN DEL CONTENIDO ARMÓNICO

Como se expuso en el Capítulo 1, existe una gran variedad de métodos que permiten mitigar el contenido armónico inyectado hacia la red por parte de cargas contaminantes de corrientes armónicas. Sin embargo, es necesario analizar minuciosamente las características del contenido armónico producido, las particularidades de la carga, y las dimensiones económicas del proyecto, para poder seleccionar el método de mitigación que sea más conveniente para nuestro caso de estudio. En esta sección se propondrá medidas que permitan mitigar el contenido armónico que se estima será inyectado por los sistemas de iluminación artificial del Departamento 1 y Departamento 2, diseñados previamente, sistemas que utilizarán luminarias B, dadas sus características sobresalientes en comparación con las demás luminarias.

3.3.1. ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

Desde el punto de vista técnico, la mejor opción para mitigar las corrientes armónicas inyectadas por las luminarias vendría a ser la conexión de un filtro activo. Esto debido a que, como se observó en los resultados obtenidos mediante las mediciones para cada una de las luminarias LED con dimerización, la gran mayoría de componentes armónicas de corriente sobrepasan los límites establecidos por la normativa respectiva. Y, cabe recalcar, que la función de los filtros activos es sensar en tiempo real variaciones en las formas de onda de voltaje y corriente, para que, en caso de advertir perturbaciones, este inyecte corrientes o voltajes suplementarios que permitan reconstruir una forma de onda

completamente senoidal [27]. Empero, dadas las dimensiones económicas del caso de estudio, sería muy costosa su implementación en comparación con los réditos monetarios posibles a obtenerse. Debido a su alto costo los filtros activos son conectados generalmente en grandes industrias.

Una medida que podría implementarse es el incremento del calibre del neutro, para evitar que este se sobrecaliente debido a las corrientes armónicas circulantes. Sin embargo, este método no disminuye la magnitud de las corrientes armónicas, por lo que no se está solucionando nada.

De igual manera, al analizar los resultados adquiridos mediante la campaña de medición, se nota que las componentes 3,5 y 7, son las más peligrosas, dado su alto valor porcentual en función de la onda fundamental, y su elevada magnitud en miliamperios. Por lo que, se ha decidido diseñar un filtro pasivo pasa bajos que bloquee el paso de corrientes armónicas de frecuencias altas, ya que este tipo de filtros son de fácil diseño e implementación, lo cual los vuelve idóneos para aplicaciones residenciales.

3.3.2. ESTIMACIÓN DE LA INYECCIÓN ARMÓNICA TOTAL

Los ensayos en laboratorio se realizaron únicamente para luminarias individuales, por lo cual se obtuvo el valor del contenido armónico que inyecta una luminaria LED B. Sin embargo, para diseñar el filtro pasivo es necesario tener los valores del contenido armónico inyectado por todo el sistema de iluminación artificial de cada uno de los departamentos. Para lograr esto, sea ha calculado un estimativo del contenido armónico que producirían todas luminarias en funcionamiento para cada departamento, considerando para los fines pertinentes que las componentes armónicas se sumen aritméticamente[25]. El filtro se diseñará para las luminarias operando a potencia nominal, dado que para este caso se obtuvieron los mayores valores de corriente en magnitud.

En primer lugar, la Tabla 3.20 presentan los valores de corrientes armónicas que inyectarían por separado la luminaria LED y el dispositivo de dimerización. Esto se determinó en base a las mediciones realizadas al dispositivo de dimerización energizando a la luminaria incandescente, así como también energizando a la luminaria LED.

Tabla 3.20. Inyección de corrientes armónicas en porcentaje y magnitud provocadas por el dispositivo de dimerización y la luminaria LED

Componente	Corriente Armónica [%]			Corriente Armónica [mA]		
	DIM + LED	DIM	LED	DIM + LED	DIM	LED
3	43,78	32,35	11,43	24	17,79	6,2865
5	25,79	17,29	8,5	14	9,504	4,675

7	26,26	12,81	13,45	15	7,046	7,3975
---	-------	-------	-------	----	-------	--------

Con dichos valores individuales, es necesario estimar los valores de corrientes armónicas que inyectarían los sistemas de iluminación del Departamento 1 y Departamento 2 diseñados previamente.

En la Tabla 3.21, se presenta la cantidad de luminarias calculadas para el Departamento 1 en el diseño con el software DIALux Evo, junto con las potencias activas y reactivas de cada área de trabajo.

Tabla 3.21. Cantidad de luminarias, potencia activa total y potencia reactiva total de cada área de trabajo del Departamento 1

Área	# Luminarias	Potencia Total [W]	Potencia Reactiva [VAr]
Dormitorio Máster	7	42	7
Dormitorio 1	6	36	6
Sala-Comedor	7	42	7
Cocina	6	36	6
Lavandería	2	12	2
Baño Máster	1	6	1
Baño 1	1	6	1
Pasillo	1	6	1
Total	31	186	31

Es posible observar que la cantidad total de luminarias para el Departamento 1 es de 31. De igual manera es necesario aclarar que, para la estimación del valor de las corrientes armónicas se requiere considerar el número de dispositivos de dimerización, dado que, como se determinó previamente, estos dispositivos también inyectan corrientes armónicas. Asumiendo que se instalará un dispositivo de dimerización por cada área de trabajo, se obtiene que el número total para el Departamento 1 es de 8 dispositivos.

Con los valores obtenidos en las mediciones individuales, y considerando que los valores de corriente para las 31 luminarias se sumarían aritméticamente, se han estimado los valores de corrientes para el sistema de iluminación del Departamento 1, dichos valores se presentan en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Estimación del contenido armónico inyectado por todas las luminarias que conforman el sistema de iluminación del Departamento 1

Componente	LED Individual [mA]	Sistema LED [mA]
Fund.	79	2449

3	17,79	551,49
5	9,504	294,624
7	7,046	218,426

De igual forma, se estima la inyección de corrientes armónicas por parte de los 8 dispositivos de dimerización, y se exhiben en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Estimación del contenido armónico inyectado por todos los dispositivos de dimerización que conforman el sistema de iluminación del Departamento 1

Componente	DIM individual [mA]	DIM Sistema [mA]
3	17,79	142,32
5	9,504	76,032
7	7,046	56,368

Con los valores obtenidos previamente, se calcula el estimativo de las corrientes armónicas inyectadas por todo el sistema de iluminación, conformado por las luminarias LED y los dispositivos de dimerización, y se exponen en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Estimación de las corrientes armónicas que inyecta el sistema de iluminación artificial del Departamento 1

Componente	Luminarias LED [mA]	Dimerizadores [mA]	Total [mA]
Fund.	2449	-	2449
3	551,49	142,32	693,81
5	294,624	76,032	370,656
7	218,426	56,368	274,794

De manera similar, en la Tabla 3.25 se muestran los valores para el Departamento 2. Al ser un departamento de mayores dimensiones la cantidad de luminarias calculadas mediante el software DIALux fue mayor, obteniéndose que se necesitan 53 luminarias para cumplir con los requerimientos lumínicos mínimos. En este caso, se asume que el número de dispositivos de dimerización es igual a 14, ya que en el área de trabajo Cocina-Comedor tiene una gran cantidad de luminarias.

Tabla 3.25. Cantidad de luminarias, potencia activa total y potencia reactiva total de cada área de trabajo del Departamento 2

Área	# Luminarias	Potencia total [W]	Potencia Reactiva [VAr]
Dormitorio Máster	9	54	9
Dormitorio 1	7	42	7

Dormitorio 2	8	48	8
Sala	4	24	4
Estar TV	1	6	1
Cocina-Comedor	14	84	14
Cuarto de Máquinas	2	12	2
Baño D. Máster	2	12	2
Baño D1	1	6	1
Baño D2	2	12	2
Baño Social	1	6	1
Balcón	1	6	1
Pasillo	1	6	1
Total	53	318	53

Para este caso se estima la inyección armónica total de corriente como se hizo previamente, sumando aritméticamente la inyección armónica individual de cada luminaria y dispositivo de dimerización. Los resultados de la inyección armónica de las 53 luminarias junto con los 14 dispositivos de dimerización se muestran a continuación en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Estimación de las corrientes armónicas que inyecta el sistema de iluminación artificial del Departamento 1

Componente	Luminarias LED [mA]	Dimerizadores [mA]	Total [mA]
Fund.	4187	-	4187
3	942,87	249,06	1191,93
5	504	133,056	637,056
7	373,438	98,644	472,082

3.3.3. MODELACIÓN

Con todos los valores estimados, se procede a modelar el sistema de iluminación como una carga no lineal que inyecta corrientes armónicas a la red. Se medirá el THD que inyectaría la carga modelada, para que posteriormente se compare el valor del THD con la conexión del filtro diseñado.

Para la modelación, nos remitimos a la sección. Con la diferencia de que, para el presente caso se considera únicamente las componentes armónicas 3,5 y 7. Esto se debe a que dichas componentes presentaron los valores porcentuales más elevados. La magnitud de la resistencia se determina en base al voltaje medido, y a la potencia activa operativa que se estima para todo el sistema de iluminación artificial. Para la cual se utiliza la ecuación 3.1.

$$R[\Omega] = \frac{V^2[V]}{P[W]} \quad (3.1)$$

Donde:

R: Resistencia del sistema de iluminación

V: Voltaje de alimentación

P: Potencia consumida por el sistema de iluminación

$$R = \frac{93.479^2}{318} = 27.471 \quad (3.2)$$

$$R = 55\Omega \quad (3.3)$$

En la Figura 3.34 se presenta la modelación del sistema de iluminación artificial como una carga no lineal. Las fuentes de corriente representan la inyección de la corriente de frecuencia fundamental, así como también representa a las corrientes armónicas de orden 3, 5 y 7. La carga se encuentra energizada por el voltaje de la red, con un valor RMS de 92.479 V, debido a que este es el voltaje entregado por el dispositivo de dimerización cuando opera a potencia nominal. Asimismo, se conectó un medidor de THD, mediante el cual se observa que la carga inyectaría una distorsión armónica total de corriente de 88.61%.

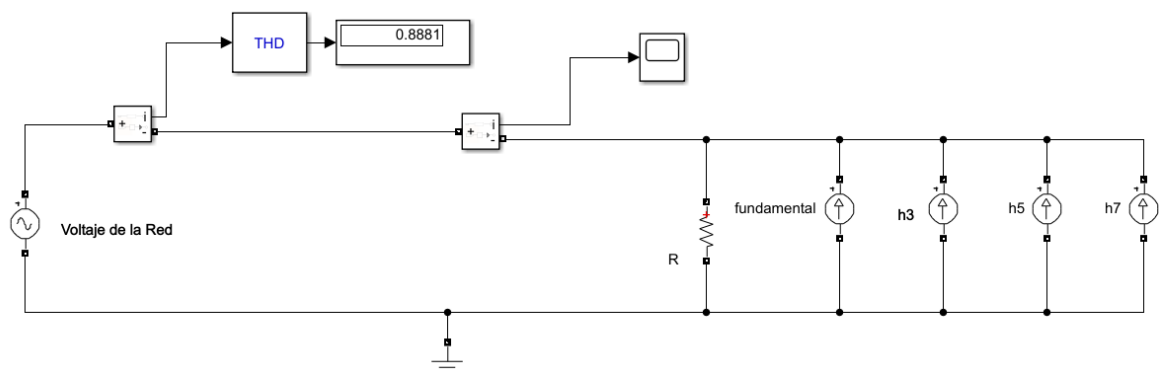


Figura 3.34. Modelación del sistema de iluminación artificial de Departamento 1 como una carga no lineal [Elaboración propia]

3.3.4. DISEÑO DEL FILTRO

El filtro pasa bajos que se diseñará para mitigar el contenido armónico inyectado es un filtro tipo LC, mismo que está formado por un capacitor y un inductor. Se ha seleccionado este tipo de filtro debido a su simplicidad y funcionalidad. La función del filtro es permitir la circulación de corrientes de baja frecuencia, y mitigar aquellas de frecuencias elevadas,

con lo cual se logra reducir la distorsión armónica total de corriente considerablemente. Desde el punto de vista técnico este filtro presenta la ventaja de su reducido tamaño, asimismo no necesita de una fuente de energía adicional para su funcionamiento[9][50]. El filtro en cuestión se sintoniza a una frecuencia de 180°, ya que la componente armónica de mayor magnitud es la de orden 3. A continuación, se presenta la ecuación utilizada para calcular el valor de cada componente del filtro, en base al principio de resonancia[9].

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 * L * (h_0)^2} \quad (3.4)$$

Donde:

f: Frecuencia fundamental.

h_0 : Frecuencia de corte.

L: Valor de inductancia.

C: Valor de capacitancia.

En la Figura 3.35 se presenta el diagrama de conexión del filtro pasa bajos, como es posible observar, el filtro es conectado en paralelo con la carga, ocasionando que las corrientes inyectadas por la carga fluyan hacia el filtro, evitando así que lleguen hacia la fuente (red eléctrica).

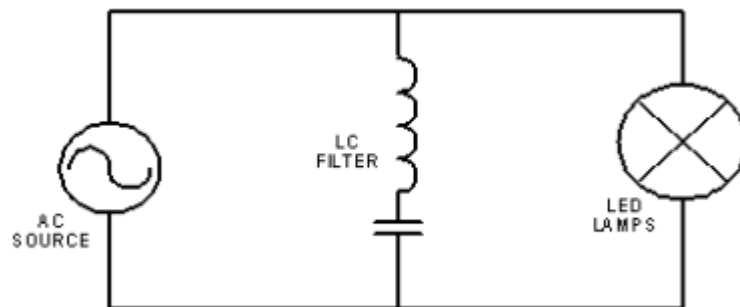


Figura 3.35. Diagrama de conexión del filtro pasa bajos [9]

Asumiendo que se utilizará un inductor de 80 mH, una frecuencia de corte de 180 Hz, con su componente armónica respectiva, la de orden 3, se calcula el valor del capacitor.

$$C = \frac{1}{(2\pi * 60)^2 * (0.08 H) * (3)^2} \quad (3.5)$$

$$C = 9.8 \mu F \quad (3.6)$$

Luego de diseñar el filtro, se procede a conectarlo en paralelo con la carga no lineal. EL circuito simulado se presenta en la Figura 3.36. Como se mencionó previamente, el filtro atrae las corrientes hacia este, logrando que las corrientes armónicas no circulen hacia la red, con lo cual el THD se reduce drásticamente hasta un valor de 14.56%. La disminución del THD permite una considerable mejora en la calidad del producto eléctrico.

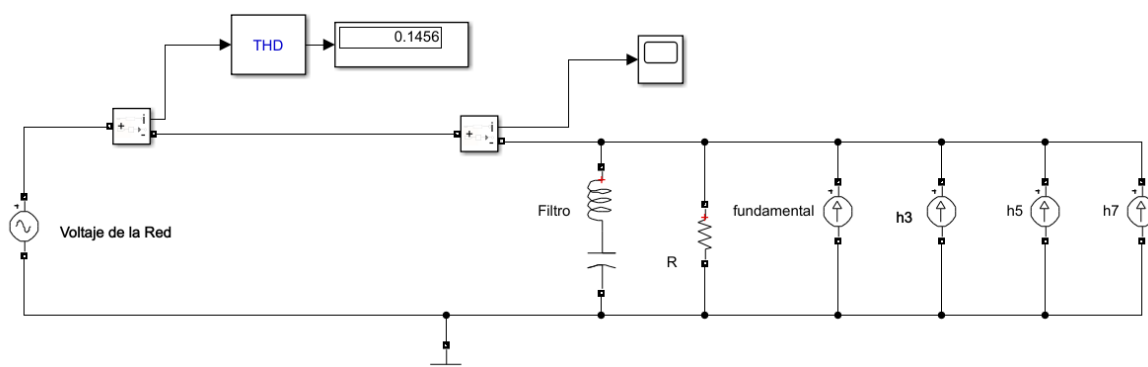


Figura 3.36. Modelación de la mitigación de las corrientes armónicas mediante la conexión del filtro pasa bajos [Elaboración propia]

En el Anexo I se presentan las gráficas de los circuitos de modelación para el Departamento 2.

3.4 ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO

En este capítulo se presenta el estudio técnico y económico realizado para la implementación de los filtros pasivos, para la mitigación del contenido armónico inyectado por los sistemas de iluminación artificial con luminarias LED con dimerización del Departamento 1 y del Departamento 2.

3.4.1. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

El análisis técnico y económico se efectúa con la finalidad de determinar si la implementación de los filtros pasivos para mitigar el contenido armónico causado por las luminarias LED con dimerización es viable o no desde el punto de vista técnico y económico. Cabe aclarar que las corrientes armónicas provocan pérdidas de energía eléctrica, por lo que, al mitigarlas, las pérdidas se reducirían permitiendo un ahorro en el pago de la tarifa eléctrica.

Desde el punto de vista técnico, la implementación de los filtros debe realizarse en el tablero de distribución de cada departamento, ya que allí se encuentran los puntos de conexión de los circuitos de iluminación. Los departamentos seleccionados como caso de

estudio cuentan con sus tableros de distribución en el cuarto de máquinas, por lo cual hay el espacio necesario para una conexión adecuada de los filtros.

El análisis económico se realiza tomando como período de tiempo la vida útil de las luminarias, la cual está especificada por el fabricante como el número de horas que funcionaría la luminaria de forma óptima. Este tiempo de vida útil ha sido estimado mediante pruebas en laboratorio realizadas por el fabricante. El tiempo de vida útil de las luminarias B seleccionadas es de 25000 horas. Se considera que las luminarias estarán encendidas un promedio de 6 horas diarias, dando como resultado una vida útil de 10 años. Debido a esto, al estudio económico será realizado para un período de 8 años. La vida útil de los capacitores depende mucho de la temperatura a la que opera, sin embargo, también se considerará que su vida útil es de 10 años.

3.4.2. AHORROS

En primer lugar, es necesario calcular cuál es el valor de las pérdidas de energía eléctrica causadas por las corrientes armónicas. Para cuantificar el porcentaje de pérdidas provocado por las componentes armónicas, nos referimos a la Ecuación 3.7, la cual permite determinar el indicador necesario para estimar el porcentaje de pérdidas [51][52].

$$Pe_h = \frac{i_{af}^2 + i_{bf}^2 + i_{cf}^2}{i_{at}^2 + i_{bt}^2 + i_{ct}^2} \quad (3.7)$$

Donde:

Pe_h : Porcentaje de pérdidas de potencia por armónicos

i_{xf} : Componente fundamental de corriente en la fase x.

i_{xt} : Valor total de corriente en la fase x.

En este caso, al trato de un circuito monofásico, se toma en cuenta únicamente una fase, con lo cual el resultante es la Ecuación 3.8.

$$Pe_h = \frac{i_{af}^2}{i_{at}^2} \quad (3.8)$$

Se procede a reemplazar los valores medidos para la luminaria operando a potencia nominal, dado a que potencia nominal se obtuvieron las magnitudes de corriente más elevadas.

$$Pe_h = \frac{55^2}{79^2} = 48.47\% \quad (3.9)$$

Como se puede observar, el indicador da un valor del 48.47%, lo cual nos muestra que casi la mitad de la potencia consumida por la luminaria con dimerización, operando a potencia nominal, es debido a las corrientes armónicas.

Para corroborar el valor porcentual de potencia que es consumida por las corrientes armónicas, se ha determinado también dicho valor en base a la potencia total, y a la potencia consumida por la corriente fundamental. La ecuación 3.10 es utilizada para calcular la potencia total.

$$P_T = I_T^2 * R \quad (3.10)$$

Donde:

P_T : Potencia total consumida

I_T : Corriente total circulante

R: Resistencia del sistema de iluminación

De manera similar, la ecuación 3.11 se emplea para calcular la potencia consumida por la componente de corriente fundamental.

$$P_f = I_f^2 * R \quad (3.11)$$

Donde:

P_T : Potencia consumida por la potencia fundamental

I_T : Corriente total circulante

R: Resistencia del sistema de iluminación

La potencia perdida debido a las corrientes armónicas se obtiene restando la potencia de la corriente fundamental, de la potencia total, como se presenta en la ecuación 3.12

$$P_L = P_T - P_f \quad (3.12)$$

$$P_L = I_T^2 * R - I_f^2 * R = 166880[W] \quad (3.13)$$

Con el valor de la potencia perdida, es posible determinar el porcentaje de pérdidas en función de la potencia total consumida.

$$\%P_L = \frac{P_L}{P_T} * 100 \quad (3.14)$$

$$\%P_L = \frac{166880}{343255} * 100 = 48.61\% \quad (3.15)$$

Este valor de porcentaje de pérdidas coincide con el valor calculado previamente, por lo que se considera como válido para realizar el estudio económico.

Luego de determinar este indicador, es imperativo estimar el consumo de energía anual que se tendría sin la conexión del filtro pasivo, y, haciendo uso del indicador, calcular el valor de las pérdidas que sería causadas por las corrientes armónicas. A continuación, en la Tabla 3.27 y en la Tabla 3.28, se presenta el consumo estimativo anual del sistema de iluminación artificial sin la conexión del filtro, para el Departamento 1, y Departamento 2, respectivamente.

Tabla 3.27. Consumo estimativo anual para el Departamento 1 utilizando luminarias LED con dimerización

Área	# Luminarias	Potencia Total [W]	Consumo[kWh/a]
Dormitorio Máster	7	38,5	88,5
Dormitorio 1	6	33	74
Sala-Comedor	7	38,5	60,5
Cocina	6	33	130
Lavandería	2	11	6
Baño Máster	1	5,5	4
Baño 1	1	5,5	5
Pasillo	1	5,5	6
Total	31	170,5	374

Tabla 3.28. Consumo estimativo anual para el Departamento 2 utilizando luminarias LED con dimerización

Área	# Luminarias	Potencia total [W]	Consumo[kWh/a]
------	--------------	--------------------	----------------

Dormitorio Máster	9	49,5	113
Dormitorio 1	7	38,5	88,5
Dormitorio 2	8	44	98
Sala	4	22	42
Estar TV	1	5,5	11
Cocina-Comedor	14	77	300
Cuarto de Máquinas	2	11	25
Baño D. Máster	2	11	7,5
Baño D1	1	5,5	5
Baño D2	2	11	9
Baño Social	1	5,5	5
Balcón	1	5,5	11
Pasillo	1	5,5	6
Total	53	291,5	721

Con los datos del consumo energético por parte del sistema de iluminación con luminarias LED con dimerización, se determinan las pérdidas de energía debido a las corrientes armónicas, las cuales, al ser eliminadas mediante la implementación del filtro, vendrían a convertirse en ahorros de energía. Por lo cual, el valor de este ahorro se obtiene con la multiplicación del consumo energético total por el indicador calculado previamente, cuyo valor es del 48.47%. Este valor de ahorro se alcanza considerando que el filtro elimine el contenido armónico en su totalidad, sin embargo, los filtros pasivos ayudan a mitigar las corrientes armónicas, pero no las eliminan completamente. Por lo cual, para efectuar un estudio más realista, se considera que el filtro pasivo pasa bajo suprime únicamente el 50% de los armónicos, por lo que el indicador que se empleará será del 24.23%, y no del 48.47%.

En la Tabla 3.29, se exhiben los valores de consumo de energía, con y sin filtro. Además, se presenta el respectivo ahorro de energía eléctrica que se obtendría.

Tabla 3.29. Comparativa entre el consumo energético con LED convencional y dimerización para el Departamento 1 y Departamento 1

Área	Consumo [kWh/a]		Ahorro [kWh/a]
	Sin Filtro Pasivo	Con Filtro Pasivo	
Departamento 1	374	283,36	90,64
Departamento 2	721	546,27	174,73

3.4.3. COSTOS

Los costos son un factor muy importante para considerar al momento de realizar el análisis de la factibilidad económico. El costo de instalación generalmente es el más significativo. Para determinar este costo se precisa conocer el precio de los elementos necesarios para la implementación del filtro pasivo, el cual está compuesto por un capacitor y un inductor. Además, se necesita considerar el costo de la mano de obra. El precio de los equipos fue obtenido de páginas web de venta. En la Tabla 3.30 se presentan los valores del costo requerido para la implementación del filtro pasivo.

Tabla 3.30. Costo requerido para la implementación de un filtro pasivo en un sistema de iluminación con LED con dimerización

Rubro	Costo Unitario [USD]	Cantidad	Costo Total [USD]
Capacitor 9.8uF 400V	15	1	15
Inductor 80mH 3A	13	1	4
Mano de Obra	25	1	25
Total			44

En este caso no se consideran costos de operación y mantenimiento, ya que, al tratarse de sistemas de iluminación residencial, el costo de operación es inexistente, y el mantenimiento regularmente es omitido por el propietario, ya que este no requiere más que una limpieza superficial.

3.4.4. FLUJO DE FONDOS

El análisis de flujo de fondos se ha realizado para el período de vida útil de los elementos, mismo que se ha determinado como diez años. En la Figura 3.37 se representan a detalle los valores de ingresos y egresos a lo largo del periodo de tiempo que se considera para el estudio económico. Notándose que como egreso se tiene únicamente la inversión inicial necesario para la implementación del filtro pasivo. Ya que, como se mencionó anteriormente, el costo de operación y mantenimiento se considera inexistente. Mientras que, en la parte de ingresos, se presentan los valores que se evitarían pagar en la tarifa eléctrica, debido a la mitigación de las corrientes armónicas.

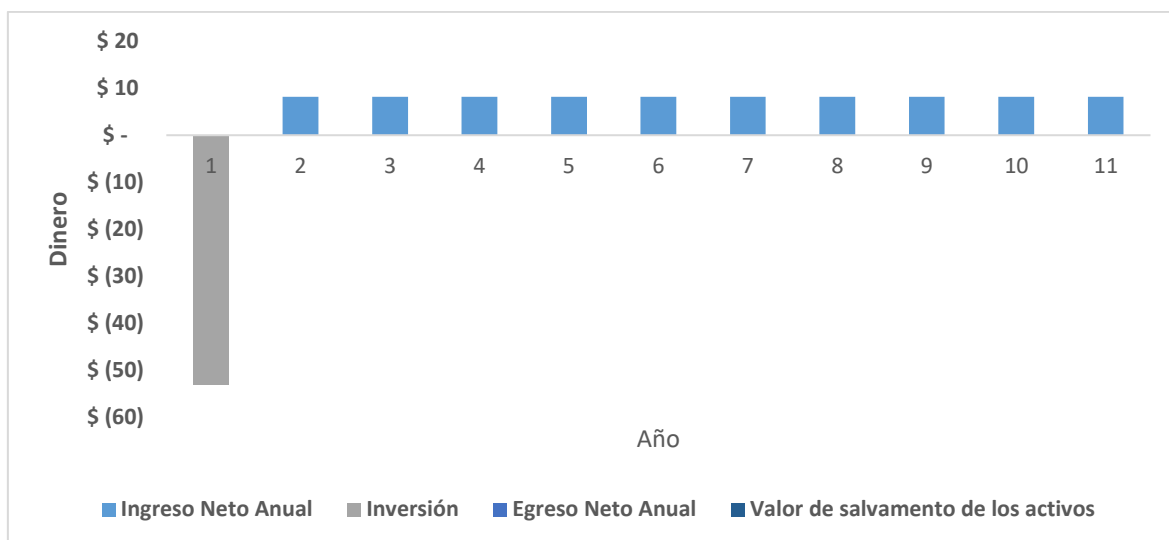


Figura 3.37. Diagrama de flujo de fondos para la implementación del filtro pasa bajos [Elaboración propia]

3.4.5. VALOR ACTUAL NETO

La tasa de interés empleada para determinar el Valor Actual Neto es del 10%. El valor de esta tasa fue otorgado por el Banco Central del Ecuador [53]. Además, para determinar el VAN, se utilizó la Ecuación 1.12 mostrada en el marco teórico.

A continuación, en la Tabla 3.31 se exhiben los valores obtenidos para el cálculo del VAN de nuestro caso de estudio, mostrando cada valor llevado a valor presente.

Tabla 3.31. Cálculo Valor Actual Neto

Año	Flujo de fondos [\$]	Factor de actualización	Valor actual [\$]
1	-44,84	1,10	-40,77
2	8,16	1,21	6,74
3	8,16	1,33	6,13
4	8,16	1,46	5,57
5	8,16	1,61	5,07
6	8,16	1,77	4,60
7	8,16	1,95	4,19
8	8,16	2,14	3,81
9	8,16	2,36	3,46
10	8,16	2,59	3,15
Valor Actual Neto			1,94

El Valor Actual Neta resultante tiene un valor de 1.94\$, por lo cual, al ser un valor mayor que cero, se determina que la implementación del filtro resultaría viable.

3.4.6. TASA INTERNA DE RETORNO

La Tasa Interna de Retorno se calcula empleando el software computacional Excel, específicamente la herramienta de análisis Solver, misma que permite resolver problemas matemáticos.

La Tabla 3.32 muestra los cálculos que se efectuaron para la determinación de la Tasa Interna de Retorno, la cual se logra cuando el VAN tiene un valor de cero.

Tabla 3.32. Cálculo Tasa Interna de Retorno

Año	Flujo de fondos [\$]	Factor de actualización	Valor actual [\$]
1	-44,84	1,11	-40,33
2	8,16	1,24	6,60
3	8,16	1,37	5,93
4	8,16	1,53	5,34
5	8,16	1,70	4,80
6	8,16	1,89	4,32
7	8,16	2,10	3,88
8	8,16	2,34	3,49
9	8,16	2,60	3,14
10	8,16	2,89	2,82
VAN			0,00
TIR			11,19

El valor obtenido del TIR es del 11,19%. Y, al ser este valor mayor a la tasa de oportunidad del 10%, se establece la viabilidad del proyecto.

3.4.7. RELACIÓN BENEFICIO COSTO

La relación costo beneficio se determina empleando la misma tasa de interés que para el VAN. El resumen con los resultados obtenidos de ingresos y egresos se exhibe en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33. Relación Beneficio Costo

Año	Ingreso Neto	Egreso Neto	Factor de actualización	Valor Actual Ingresos	Valor Actual Egresos
-----	--------------	-------------	-------------------------	-----------------------	----------------------

1	8,16	-53	1,10	7,42	-48,18
2	8,16	0	1,21	6,74	0
3	8,16	0	1,33	6,13	0
4	8,16	0	1,46	5,57	0
5	8,16	0	1,61	5,07	0
6	8,16	0	1,77	4,60	0
7	8,16	0	1,95	4,19	0
8	8,16	0	2,14	3,81	0
9	8,16	0	2,36	3,46	0
10	8,16	0	2,59	3,15	0
Valor Total				50,12	-48,18
Beneficio / Costo					1,04

Es posible apreciar que la relación Beneficio Costo es mayor a 1, por lo cual el proyecto es viable.

En el Anexo J, se presenta el diagrama del flujo de fondos, con las respectivas tablas del análisis económico para la implementación del filtro en el Departamento 2, el cual también demostró ser incluso más viable que la implementación en el Departamento 1.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

En base a las mediciones realizadas en laboratorio a luminarias LED con dimerización de diferentes fabricantes, se ha conseguido determinar que este tipo de luminarias afectan a la calidad del producto eléctrico enormemente, debido a la elevada distorsión armónica total de corriente que inyectan a la red eléctrica. Las luminarias de cada fabricante provocan distorsiones armónicas de diferente valor, pero en todas se aprecia que el porcentaje de distorsión se incrementa de manera considerable al momento de reducir el flujo luminoso mediante el recorte de la onda de voltaje con el accionamiento del dispositivo de dimerización. Debido a esto, se diseñó un filtro pasivo que permita mitigar el contenido armónico, y así lograr que la afectación a la calidad del producto eléctrico sea mínima.

Mediante la utilización del software especializado DIALux Evo se ha realizado el diseño del sistema de iluminación artificial de dos departamentos representativos de diferentes dimensiones, comprobando que se cumplan los requerimientos lumínicos establecidos por la normativa respectiva para cada área de trabajo. Con lo cual fue posible calcular la cantidad de luminarias que se necesitarían para dichos sistemas de iluminación, así como también se pudo estimar el consumo de energía eléctrica que se tendría por parte de los circuitos de iluminación.

Empleando una fuente de voltaje regulable, y un analizador de la calidad del producto eléctrico se han medido valores de voltajes, corrientes, distorsiones armónicas totales de voltajes y de corrientes, y factores de potencia de luminarias LED con dimerización de diferentes fabricantes, y para distintos estados de dimerización, lo cual permitió obtener mediciones exactas que no sean alteradas por variaciones que se produzcan en la red eléctrica.

En base a los resultados obtenidos por medio de las mediciones, es posible concluir que las luminarias LED con dimerización inyectan un alto contenido armónico a la red eléctrica, que sobrepasa inmensamente los valores máximos establecidos por la normativa respectiva. Esto se debe al recorte en la forma de onda de voltaje que se efectúa para controlar el flujo luminoso. Cuando el recorte en la onda de voltaje es mayor, con el fin de reducir la emisión de luz, el valor de todas las componentes armónicas crece enormemente, lo cual es muy perjudicial para la calidad del producto eléctrico.

Con base al análisis de los valores de distorsión armónica adquiridos en las mediciones, y examinando las características propias del proyecto, se ha concluido que la mejor opción

para mitigar las componentes armónicas son los filtros pasivos, debido a su bajo costo, y a su simplicidad tanto en diseño, como en implementación. De igual manera, luego de las simulaciones respectivas, se comprobó la capacidad del filtro pasivo de reducir el contenido armónico inyectado por las luminarias LED con dimerización.

Una vez efectuado el análisis técnico y económico para la implementación de filtros pasivos pasa bajos, para mitigar las corrientes armónicas inyectadas por sistemas de iluminación formados por luminarias LED con dimerización, se ha determinado que su instalación es viable tanto técnica como económica. Es viable técnicamente dado que este tipo de filtros requiere tanto un diseño como una implementación sencillos. Y, es viable económicamente debido a que la relación Beneficio Costo es mayor a 1. Asimismo, el TIR es de 11,19%, lo cual supera al 10% tomado como tasa de oportunidad. En base al análisis, se estima que a partir del séptimo año el proyecto comienza a producir ganancias económicas.

En base al análisis económico realizado, fue posible determinar que las pérdidas de energía eléctrica causadas por las corrientes armónicas inyectadas por las luminarias LED con dimerización son considerables, por lo cual es imperativo reducir la magnitud de estas corrientes al mínimo posible, para que así se eviten pérdidas de energía innecesarias.

El ingreso masivo de sistemas de iluminación formados por luminarias LED con dimerización, debido a la construcción de los llamados edificios inteligentes que cuentan con sistemas de iluminación de este tipo, especialmente en las grandes urbes, ocasionará una inyección armónica importante en la red eléctrica, por lo que la calidad del producto eléctrico se verá gravemente afectada. Debido a esto, la implementación de este tipo de sistemas de iluminación debería ir acompañada siempre de medidas de mitigación que reduzcan su impacto al mínimo posible.

4.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda tomar como base el presente trabajo de titulación, para realizar mediciones en laboratorio a luminarias LED con dimerización que se utilizan para aplicaciones comerciales e industriales, las cuales generalmente son de potencias mucho mayores que las que se utilizan en aplicaciones residenciales.

Es recomendable realizar los cálculos luminotécnicos respectivos al momento de diseñar sistemas de iluminación artificial, ya que estos cálculos determinan si el diseño cumple con los requerimientos lumínicos mínimos establecidos por la normativa.

Cuando se implemente sistemas de iluminación con luminarias LED con dimerización, es imperativo acompañar su instalación con dispositivos o métodos que permitan mitigar la

inyección de corrientes armónicas al mínimo posible, para que de esta manera se proteja a la calidad del producto eléctrico de la red, y, además, se reduzcan las pérdidas de energía provocadas por la circulación de este tipo de corrientes.

Las mediciones del presente trabajo de titulación fueron realizadas únicamente en laboratorio, por lo que se recomienda también efectuar estudios con luminarias que se encuentren energizadas directamente por la red eléctrica, y funcionando en construcciones residenciales, para apreciar el comportamiento de la inyección armónica en los diferentes estados de demanda que se experimentan a lo largo de días laborables y no laborables.

Se recomienda realizar auditorías energéticas en edificios que cuentan con sistemas domóticos, para diagnosticar la afectación a la calidad del producto eléctrico por parte de los elementos que conforman este tipo de sistemas, ya que dichos dispositivos están formados por elementos no lineales. Las auditorías permitirán determinar las acciones a tomar para reducir la afectación de dichos elementos al mínimo posible.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, and M. A. Hannan, "An analysis of harmonics from dimmable LED lamps," in *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia*, 2012, pp. 182–186, doi: 10.1109/PEOCO.2012.6230857.
- [2] D. F. de Souza, P. P. F. da Silva, L. F. A. Fontenele, G. D. Barbosa, and M. de Oliveira Jesus, "Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 409–424, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.03.009>.
- [3] A. M. R. Franco, R. M. Debatin, F. C. G. Cotia, M. V. M. Silva, R. S. Ribeiro, and R. R. N. Zampilis, "Compact fluorescent lamps, LED lamps and harmonic distortion," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 575, p. 12009, 2015, doi: 10.1088/1742-6596/575/1/012009.
- [4] A. Romanska-Zapala, M. Dechnik, and K. Grzywocz, "Power Quality in Energy Efficient Buildings – a Case Study," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 603, no. 5, p. 52020, 2019, doi: 10.1088/1757-899x/603/5/052020.
- [5] H. Huang, S. Twu, S. Cheng, and H. Chiu, "A Single-Stage SEPIC PFC Converter for Multiple Lighting LED Lamps," in *4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications (delta 2008)*, 2008, pp. 15–19, doi: 10.1109/DELTA.2008.8.
- [6] G. Rata and M. Rata, "The study of harmonics from dimmable LED lamps, using CompactRIO," in *2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 2016, pp. 180–183, doi: 10.1109/DAAS.2016.7492570.
- [7] A. Gil-de-Castro, S. K. Rönnberg, and M. H. J. Bollen, "Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 146, pp. 107–114, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.026>.
- [8] M. M. U. Rehman, H. Shabbir, S. A. Rehman, S. K. Sheikh, and N. Zaffar, "A Comparative Analysis of Electrical and Photo Characteristics of LED Lights," in *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology*, 2012, pp. 219–224, doi: 10.1109/FIT.2012.46.
- [9] E. Sarwono, M. Facta, and S. Handoko, "Investigation of Passive Filter for LED Lamp," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 190, p. 12019, 2017, doi:

10.1088/1757-899x/190/1/012019.

- [10] J. J. Almeida, "Eficiencia energética e implementación de focos LED en el sistema residencial ecuatoriano," Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2016.
- [11] ARCONEL, "Regulación 004/18-Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica," p. 46, 2018.
- [12] A. Abundis, "Causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos de potencia," Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [13] J. Abraham, "Study of harmonics in buildings," University of Bath, 2013.
- [14] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, and W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, Second Edi. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [15] M. Grady, "Understanding Power System Harmonics," University of Texas at Austin, Austin, 2012.
- [16] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power system harmonics*, Second Edi. Christchurch, New Zealand: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [17] S. Li, "Sensing , communication and illumination with LED lighting systems," Eindhoven University of Technology, 2017.
- [18] P. R. Boyce, *Human Factor in Lighting*, Second Edi. London: Taylor and Francis Group, 2003.
- [19] D. F. Pereira, "Lenses optimization software for LED lighting," Universidade de Coimbra, 2014.
- [20] X. Qu, "Development and design of light-emitting-diode (LED) lighting power supplies," The Hong Kong Polytechnic University, 2009.
- [21] R. L. Boylestad and L. Nashelsky, *Electrónica : teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, Décima Edi. México: Pearson Educación, 2009.
- [22] U. S. Department of Energy, "ENERGY STAR Program Requirements for Solid State Lighting Luminaires." 2008.
- [23] EN 61000-3-2, "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-2: Limits-limits for harmonic current emissions (equipment input current<10A per phase)," 2006.
- [24] F. C. De La Rosa, *Harmonics and Power Systems*. Hazelwood: Taylor and Francis Group, 2006.

- [25] A. Carballeira and M. Á. Graña, “Repercusión del uso de la tecnología CFL y LED de iluminación en las redes de distribución,” Universidad de la Coruña, 2017.
- [26] “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*. pp. 1–29, 2014, doi: 10.1109/IEEEESTD.2014.6826459.
- [27] G. Salazar, “Calidad de la Energía Eléctrica.” Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [28] “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems,” *IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991)*. pp. 1–225, 2007, doi: 10.1109/IEEEESTD.2007.4396963.
- [29] N. F. Proaño Perez and V. A. Velasquez Zharate, “Estudio de efectos y métodos de minimización de distorsiones armónicas en equipos de distribución eléctrica, comercial e industrial,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, 2010.
- [30] V. Muthukumarasamy, S. Logeshwaran, P. H. J. Peter, and G. G. Krishna, “Mitigation of Total Harmonic Distortion using Delta – Wye Transformer as a Triplen Harmonic Filter in Three Phase Rectifier,” *Int. J. Science, Eng. Technol. Research*, vol. 6, no. 4, pp. 644–649, 2017.
- [31] O. Gouda, G. Amer, and W. A. A. Salem, “A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 1, Oct. 2011.
- [32] “IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents,” *IEEE Std C57.110TM-2018 (Revision of IEEE Std C57.110-2008)*. pp. 1–68, 2018, doi: 10.1109/IEEEESTD.2018.8511103.
- [33] J. G. Escobar, “Análisis comparativo, técnico-económico entre un sistema de iluminación convencional y uno utilizando tecnología de LEDs, aplicado en un edificio educacional,” Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [34] Y. F. Pinargote and C. E. Castro, “Estudio de armónicos producidos por la iluminación tipo fluorescente y LED en un aula del bloque B de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [35] Mario Raitelli, “Diseño de la Iluminación de Interiores,” Tucumán.
- [36] G. Rodas, “Iluminación eficiente mediante software DIALux en Biblioteca Central de

- la Universidad de Piura,” Universidad de Piura, 2005.
- [37] SONEL SA, “USER MANUAL POWER QUALITY ANALYZERS PQM-702 PQM-710,” 2017, pp. 115–126.
- [38] A. F. Barbosa Franco, L. A. Noguera Vega, and W. M. Giral Ramírez, “Análisis de distorsión armónica en iluminación LED,” *Rev. vínculos*, vol. 14, no. 2 SE- Investigación y Desarrollo, pp. 95–107, Dec. 2017, doi: 10.14483/2322939X.12520.
- [39] R. J. Bravo and N. Y. Abed, “Experimental evaluation of the harmonic behavior of LED light bulb,” in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2013, pp. 1–4, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672991.
- [40] Compatibilidad electromagnética (CEM), *Límites para las emisiones de corriente armónica. UNE-EN 61000-2-3*. España, 2006, p. 34.
- [41] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, and M. A. Hannan, “An analysis of harmonic diversity factors applied to LED lamps,” in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2012, pp. 1–5, doi: 10.1109/PowerCon.2012.6401285.
- [42] S. Ananwattanaporn and A. Ngaopitakkul, “Power quality analysis in light emitting diode lamps,” in *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE.2016.7521765.
- [43] C. Ramírez, M. García, C. Pantoja, and A. Zambrano, *Fundamentos de Matemáticas Financieras*, Editorial. Cartagena de Indias, 2009.
- [44] L. Achig, *Maestría en gerencia de proyectos educativos y sociales: Enfoque y métodos de la investigación científica 3*. afefce, 2001.
- [45] D. Argoti, “DISEÑO DE UNA MICRO RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GENERACIÓN HÍBRIDA FOTOVOLTAICA-TÉRMICA PARA ATENDER A LA COMUNIDAD AISLADA ZANCUDOCOCHA,” Escuela Politécnica Nacional, 2021.
- [46] M. C. Brusil Guamán, “ANÁLISIS DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS PRODUCIDAS POR LUMINARIAS DE TECNOLOGÍA LED EN UNA RED DE ALUMBRADO PÚBLICO,” Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [47] Gobierno Autónomo Descentralizado del Distrito Metropolitano de Quito, “Herramienta Eco-Eficiencia.” [Online]. Available:

<http://sthv.quito.gob.ec/portfolio/eco-eficiencia2/#>. [Accessed: 06-Apr-2021].

- [48] R. Colomer Rodríguez, “Estudio y diseño del sistema de iluminación de un centro de uso general,” Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [49] IESNA, *The Lighting Handbook: Reference and Application*. United States of America: Illuminating Engineering Society, 2011, p. 1087.
- [50] F. A. Karim, M. Ramdhani, and E. Kurniawan, “Low pass filter installation for reducing harmonic current emissions from LED lamps based on EMC standard,” in *2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, 2016, pp. 132–135, doi: 10.1109/ICCEREC.2016.7814966.
- [51] P. Castillo Molina, “Evaluación técnico-económica para disminución de pérdidas por medio de eliminación de armónicos en red de distribución eléctrica,” Universidad Técnica Federico Santa María, 2020.
- [52] M. Ashour, K. Youssef, and S. El Sobki, “The cost of harmonic losses and mitigations in distribution systems,” in *CIREC 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2005, pp. 1–4, doi: 10.1049/cp:20051084.
- [53] Banco Central del Ecuador, “Sector Monetario Y Financiero.” [Online]. Available: <https://contenido.bce.fin.ec/docs.php?path=/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indice.htm>.

ANEXOS

ANEXO A. Figuras de las áreas de trabajo de los Departamentos renderizadas

ANEXO B. Figuras de las áreas de trabajo en colores falsos de los Departamentos

ANEXO C. Curvas isolux de cada área de trabajo

ANEXO D. Fotografías de las luminarias LED con dimerización sometidas a ensayos

ANEXO E. Tablas de resultados de las mediciones del contenido armónico

ANEXO F. Figuras comparativas del contenido armónica para distintos estados de dimerización

ANEXO G. Tablas de resumen de parámetros eléctricos relevantes medidos

ANEXO H. Formas de Onda de Voltajes y Corrientes de luminarias LED con dimerización

ANEXO I. Figura simulación filtro pasivo del Departamento 2

ANEXO J. Flujo de Fondos implementación filtro pasivo en Departamento 2

ORDEN DE EMPASTADO