

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

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

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE GENERAL:

**“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ARRANQUE SUAVE PARA
LUMINARIAS LED DE ALTA POTENCIA DE LA FUNDACIÓN
ILUMINAR LUZ Y COLOR PARA CUENCA”**

AUTORES:

PABLO ANDRÉS PEÑAFIEL CELI
EDISON KLÉBER CABRERA CÁRDENAS

TUTOR:

ING. EDY LEONARDO AYALA CRUZ, MSC. PhD.

CUENCA - ECUADOR

2021

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN


Nosotros, Pablo Andrés Peñafiel Celi con documento de identificación N° 0106729429 y Edison Kléber Cabrera Cárdenas con documento de identificación N°0105546311, manifestamos que:

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

Cuenca, Diciembre del 2021



Pablo Andrés Peñafiel Celi
C.I. 0106729429



Edison Kléber Cabrera Cárdenas
C.I. 0105546311

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


Nosotros, Pablo Andrés Peñafiel Celi con documento de identificación N° 0106729429 y Edison Kléber Cabrera Cárdenas con documento de identificación N°0105546311, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico con enfoque general: **“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ARRANQUE SUAVE PARA LUMINARIAS LED DE ALTA POTENCIA DE LA FUNDACIÓN ILUMINAR LUZ Y COLOR PARA CUENCA”**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Eléctrico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, diciembre del 2021



Pablo Andrés Peñafiel Celi
C.I. 0106729429




Edison Kléber Cabrera Cárdenas
C.I. 0105546311

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edy Leonardo Ayala Cruz con documento de identificación N°0105627277, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ARRANQUE SUAVE PARA LUMINARIAS LED DE ALTA POTENCIA DE LA FUNDACIÓN ILUMINAR LUZ Y COLOR PARA CUENCA”**, realizado por: Pablo Andrés Peñafiel Celi con documento de identificación N° 0106729429 y por Edison Kléber Cabrera Cárdenas con documento de identificación N° 0105546311, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción *Proyecto Técnico con enfoque general*, que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2021



Ing. Edy Leonardo Ayala Cruz, Msc. PhD.

C.I. 0105627277

Dedicatoria

Dedico mi trabajo de titulación a mis padres y hermana quienes me brindaron su apoyo incondicional en todo momento para culminar mis estudios y en especial a mi abuelita por los valores inculcados que nunca olvidaré los cuales estuvieron presente en mí a lo largo de este trayecto.

Pablo Andrés Peñafiel Celi

Dedico este trabajo de titulación a mis padres por todo el amor, comprensión, por esa alegría para ver la vida diferente y por brindarme la educación y apoyo condicional. De igual manera dedico este trabajo a mi abuelita Teresa, a mis hermanas y a mi pareja Marisol que me brindaron todo la paciencia y amor en el día a día de toda mi vida universitaria.

Edison Kléber Cabrera Cárdenas

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres y hermana quienes han sabido darme su ejemplo de trabajo y honradez hoy cuando clumino mi proyecto de titulación, les dedico a ustedes este logro, gracias por ser quienes son y por creer en mí ya que, sin sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil.

Agradezco a mi tutor el PhD. Edy Ayala por brindarme su guía, paciencia y gran disposición para la realización de este proyecto de titulación, ya que a través de sus conocimientos y ayuda se hizo posible este trabajo.

A mi compañero de tesis Edison Cabrera por ser parte de este gran logro, sin su ayuda no se hubiera podido realizar este trabajo.

Y finalmente agradezco a la Fundación Iluminar por permitirme haber desarrollo este proyecto en sus instalaciones.

Pablo Andrés Peñafiel Celi

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud y fuerzas para seguir de pie y poder culminar mis estudios de tercer nivel. De manera especial agradezco a mis padres y hermanas por haberme brindado todo el apoyo para que se cumple este gran objetivo; a mi familia en general por haber sido parte de este gran logro.

También agradezco a mi tutor Ing. Edy Ayala por ser participe de este trabajo de titulación, ya que a través de sus conocimientos y ayuda se hizo posible este trabajo.

A mi compañero de aula Andrés Peñafiel por ser parte de este gran logro, sin su ayuda no se hubiera podido realizar este trabajo.

Y finalmente agradezco a la Fundación Iluminar por permitirme haber desarrollo este proyecto técnico con enfoque general en sus instalaciones.

Edison Kléber Cabrera Cárdenas

RESUMEN

Las luminarias lighting emitting diode (LED) de alta potencia son un avance importante en el desarrollo de la iluminación debido a su versatilidad y mayor eficiencia energética, reemplazando así a las luminarias convencionales. Frente a la sustitución a gran escala de las luminarias incandescentes por luminarias LED, se han presentado inconvenientes por las altas corrientes de arranque en el momento del encendido directo, como es el caso de las luminarias LED que dispone la Fundación Iluminar en las cúpulas de la catedral de la Inmaculada Concepción de Cuenca. El encendido directo, presenta un problema que va relacionado con la magnitud de la corriente de irrupción debido a que ésta alcanza valores de hasta 100 veces su valor nominal, afectando así a la vida útil de la luminaria. Los picos de corriente dentro de los circuitos de iluminación han provocando falsas activaciones en los dispositivos de protección provocando así su desconexión, se presentan criterios de selección para el dimensionamiento de las protecciones en función de la corriente de irrupción. Al analizar la corriente pico de una luminarias LED de alta potencia y los problemas que esta pueda causar en la red, se presentan alternativas para limitar la corriente de irrupción a través de un sistema de arranque suave basado en un circuito limitador de corriente de tipo activo. En este proyecto se proponen sistemas de arranque suave por: temporización simultánea, bypass y regulación de tensión. Estos sistemas pretenden disminuir al menos el 50 % de la corriente de irrupción al momento de su encendido, los cuales están proyectadas a través de modelos que van acorde a las características eléctricas y experimentales en base al funcionamiento de la luminaria lineal LED de alta potencia. A través de simulaciones en el software Simulink se analizan respuestas de los modelos propuestos ante un encendido directo, donde se comparó la corriente pico inicial que presenta una luminaria LED con y sin un sistema de arranque suave, con el objetivo de validar la eficiencia ante la corriente de irrupción.

Abstract

High-power lighting emitting diode (LED) luminaires are a major breakthrough in lighting development due to their versatility and higher energy efficiency, thus replacing conventional luminaires. With the large-scale replacement of incandescent luminaires with LED luminaires, there have been problems due to the high starting currents at the time of direct ignition, as is the case of the LED luminaires that the “Fundación Iluminar” has in the domes of the “Catedral Inmaculada Concepción de Cuenca”. Direct ignition presents a problem related to the magnitude of the inrush current, which can reach values of up to 100 times its nominal value, thus affecting the useful life of the luminaire. The current peaks inside the lighting circuits have caused false activations in the protection devices, thus causing their disconnection, selection criteria are presented for the sizing of the protections according to the inrush current. By analyzing the peak current of a high-power LED luminaire and the problems it may cause in the network, alternatives are presented to limit the inrush current through a soft-start system based on an active current limiting circuit. In this project, soft start systems are proposed by: simultaneous timing, bypass and voltage regulation. These systems aim to reduce at least 50% of the inrush current at the moment of switching on, which are projected through models that go according to the electrical and experimental characteristics based on the operation of the high power linear luminaire. By means of simulations in Simulink software, responses of the proposed models to a direct ignition are analyzed, where the initial peak current presented by a LED luminaire with and without a soft start system was compared, with the objective of validating the efficiency before the inrush current.

Índice General

Declaratoria de Responsabilidad	II
Cesión de Derechos de Autor	III
Certificación	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Índice de Tablas	XII
Índice de Figuras	XIII
Introducción	1
1. Problema de Estudio y Objetivos	2
1.1. Problema de Estudio	2
1.2. Grupo Objetivo	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
2. Fundamentos Teóricos	4
2.1. Tecnología LED	4
2.1.1. Luminarias LED de Alta Potencia	5
2.1.1.1. Modulo Estructural de una Luminaria LED	5
2.1.1.2. Eficiencia Lumínica	6
2.1.2. Clasificación de la Iluminación LED de Alta Potencia	7
2.1.2.1. Iluminación Vial	7
2.1.2.2. Iluminación Urbana	8
2.1.2.3. Iluminación Arquitectónica	8
2.2. Fuentes de Alimentación Electrónica	9
2.2.1. Fuente de Alimentación Lineal	9
2.2.2. Fuentes de Alimentación Conmutadas	10
2.2.2.1. Impacto en la Red Eléctrica	11
2.2.3. Tipos de Control	12
2.2.3.1. Por Voltaje Constante	12

2.2.3.2.	Por Corriente Constante	12
2.3.	Corriente de Irrupción Causada por Luminarias LED	13
2.3.1.	Corriente de Irrupción Según el Ángulo de Fase	14
2.3.2.	Duración de la Corriente de Irrupción	15
2.3.3.	Medición de la Corriente de Irrupción	16
2.3.4.	Impactos y Efectos	17
2.4.	Calidad de Energía	18
2.4.1.	Perturbaciones Presentes en la Red Eléctrica	18
2.4.2.	Efectos de la Red Eléctrica en la Señal de Tensión y Corriente	19
2.4.2.1.	Variaciones de Tensión	19
2.4.2.2.	Distorsión de la Forma de Onda	19
2.4.2.3.	Transitorios en los Sistemas Eléctricos	22
2.4.3.	Características del Registrador de Datos 1735 Power Logger (Fluke)	23
2.4.3.1.	Diagramas de Fase del Registrador de Energía	24
2.5.	Interruptores Automáticos de Protección para Iluminación LEDs	26
2.5.1.	Aplicación de los Interruptores Automáticos	26
2.5.2.	Corriente de Entrada de las Luminarias LED	26
2.5.3.	Tipos de Curvas de los Interruptores Automáticos de Protección	27
2.5.4.	Curvas de Disparo para Interruptores de Baja Tensión	27
2.5.4.1.	Curva B	28
2.5.4.2.	Curva C	29
2.5.4.3.	Curva D	30
2.5.5.	Criterio de Selección de Interruptores para Iluminación LED	31
2.5.5.1.	Por la Potencia Nominal de los Drivers y la Corriente Instantánea de Disparo	32
2.5.5.2.	Por la Duración y Valor Máximo de la Corriente Pico	33
2.5.5.3.	Mediante un Factor Basado en la Duración del Pulso	34
2.5.5.4.	Por la Corriente Mínima de Disparo Instantáneo	36
2.6.	Sistema de Arranque Suave	36
2.6.1.	Circuito Limitador de Corriente	36
2.6.1.1.	Limitación Pasiva	37
2.6.1.2.	Limitación Activa	38
2.6.2.	Limitador de Corriente por Control de Derivación	40
2.6.2.1.	Limitador Bypass	40
2.6.2.2.	Limitación por SSR con Función de Cruce por Cero	41
2.6.3.	Limitador de Corriente por Retardo de Tiempo	42
2.6.3.1.	Limitador por Conmutación Temporizada	42
2.6.3.2.	Retardo de Tiempo Integral Programable o Aleatorio	43
2.6.4.	Sistema limitador de Corriente por Variación de Tensión	43
2.6.4.1.	Regulación de Tensión en el Encendido	44
2.6.4.2.	Atenuación del Flujo Luminoso	45
3.	Análisis de las Características Técnicas de las Luminarias y Fuentes LED	46
3.1.	Luminarias LED de Uso Arquitectónico de Alta Potencia	46
3.1.1.	Clasificación de Luminarias Lineales LED	46
3.1.2.	Análisis de las Luminarias Lineales por el Tipo de Fuente y Corriente de Irrupción	48
3.1.3.	Clasificación de Luminarias LED Tipo Flood	49
3.1.4.	Análisis de las Luminarias Tipo Flood por el Tipo de Fuente y Corriente de Irrupción	50
3.2.	Luminarias LED de Uso Arquitectónico de la Catedral Inmaculada Concepción	51

3.2.1.	Luminarias Lineales LED	51
3.2.2.	Luminarias LED Tipo Flood	52
3.3.	Fuente de Alimentación Conmutada para Luminarias LED de Alta Potencia	53
3.3.1.	Fuente de Alimentación Serie HLG-320H	53
3.3.2.	Codificación del Modelo HLG-320H	54
3.3.3.	Análisis de la Clasificación de las Fuentes de Alimentación Conmutada	54
4.	Adquisición y Análisis de Datos	56
4.1.	Obtención de Datos Durante el Encendido de las Luminarias LED	56
4.1.1.	Análisis de la Calidad de Energía del Suministro Eléctrico	59
4.1.1.1.	Nivel de Voltaje de Suministro	59
4.1.1.2.	Variaciones Rápidas del Voltaje o Flicker	60
4.1.1.3.	Distorsión Armónica del Voltaje (THDv)	61
4.1.1.4.	Desequilibrio de Voltaje	61
4.1.2.	Análisis de la Variación de Corriente y Voltaje en los Circuitos de Iluminación LED de las Cúpulas	62
4.1.2.1.	Voltaje Máximo	62
4.1.2.2.	Corriente Máxima de las Líneas de Alimentación	64
4.1.2.3.	Corriente Máxima del Sistema	65
4.1.2.4.	Voltaje y Corriente Máxima del Sistema	66
4.2.	Pruebas del Laboratorio de una Luminaria Lineal LED de 72W	68
4.2.1.	Pruebas de Corriente y Voltaje	68
5.	Propuestas en Base a Simulaciones de Sistemas de Arranque Suave	70
5.1.	Análisis y Simulación de la Corriente de Irrupción de una Luminaria LED	70
5.1.1.	Establecimiento de Parámetros de la Corriente de Irrupción	70
5.1.2.	Respuesta Experimental de la Corriente Irrupción	73
5.1.2.1.	Análisis de la Corriente de Irrupción en Conexión Paralela	76
5.2.	Análisis y Simulación de las Propuestas del Sistema de Arranque Suave	77
5.2.1.	Arranque Suave por Temporización Simultánea	77
5.2.2.	Arranque Suave por Bypass	79
5.2.3.	Arranque Suave por Regulador de Tensión	81
6.	Conclusiones y Recomendaciones	84
6.1.	Conclusiones	84
6.2.	Recomendaciones	86
Anexos		87
A.	Diagrama Unifilar de los Circuitos de Iluminación de las Cúpulas de la Catedral de Cuenca	87
Glosario		90

Índice de Tablas

2.1. Corriente mínima de activación de un MCB/RCBO.	34
3.1. Clasificación de luminarias lineales LED que dispone la Fundación Iluminar.	47
3.2. Clasificación de las luminarias lineales LED por su tipo de fuente y corriente de irrupción.	48
3.3. Clasificación de luminarias LED de alta potencia que dispone la Fundación Iluminar.	49
3.4. Clasificación de las luminarias tipo flood LED por su tipo de fuente y corriente de irrupción.	50
3.5. Codificación del modelo según el fabricante MEAN WELL.	54
3.6. Clasificación de las fuentes de alimentación para iluminación LED.	55
4.1. Períodos de medición máximos posibles.	57
4.2. Resumen del cumplimiento de los indicadores de calidad.	62
4.3. Voltajes máximos de las líneas de alimentación.	63
4.4. Corrientes máximas y nominales de cada línea de alimentación.	65
4.5. Corriente máxima del sistema de iluminación.	66
4.6. Resumen de los valores de voltaje y corriente durante el encendido de las luminarias LED.	68
5.1. Valores técnicos de una luminaria LED de 72W	74
5.2. Valores obtenidos de simulink	74
5.3. Análisis de la corriente de irrupción	76
5.4. Tiempo de activación de las de las luminarias por relay.	79
5.5. Parámetros de simulación sistema de arranque suave por bypass.	81
5.6. Parámetros para la configuración de la fuente regulable de tensión	82

Índice de Figuras

2.1. Configuración de una luminaria LED de alta potencia.	6
2.2. Luminaria vial LED.	7
2.3. Luminaria urbana LED.	8
2.4. Luminaria arquitectónica LED.	8
2.5. Diagrama de bloques de una fuente lineal.	10
2.6. Diagrama de bloques de una fuente conmutada.	11
2.7. Fuente conmutada Mean Well.	13
2.8. Pico de corriente máxima a 90° del ángulo de fase AC.	14
2.9. Pico de corriente mínima a 0° del ángulo de fase AC.	14
2.10. Parámetros de análisis de la corriente de irrupción.	15
2.11. Parámetros de medición de la corriente de irrupción.	16
2.12. Señal de tensión con ruido.	20
2.13. Forma de onda contamina con distorsión armónica.	21
2.14. Forma de onda sinusoidal con desplazamiento DC.	21
2.15. Perturbación periódica de tensión causado por la operación de un convertidor.	22
2.16. Transitorio impulsivo de voltaje.	23
2.17. Equipo 1735 Power Logger - Fluke.	23
2.18. Conexión de fase única.	25
2.19. Conexión de fase dividida.	25
2.20. Conexión de estrella trifásica.	26
2.21. Curva B.	28
2.22. Curva C.	29
2.23. Curva D.	30
2.24. Curvas B, C y D de protección.	31
2.25. Número de controladores vs potencia nominal de un MCB 10.	32
2.26. Número de controladores vs potencia nominal de un MCB 16.	32
2.27. Curva media de no disparo para el rango de tiempo de 50 μ s a 10 ms.	33
2.28. Curva media de no disparo para el rango de tiempo de 50 μ s a 10 ms.	34
2.29. Selección del MCB/RCBO por su factor K.	35
2.30. Diagrama de bloques para la limitación pasiva de la corriente de entrada.	38
2.31. Diagrama de bloques para la limitación activa de la corriente de entrada.	39
2.32. Esquema de control por bypass con control de retardo.	41
2.33. Esquema de control por relay con control de retardo.	43
2.34. Esquema de control por variación de tensión.	44
3.1. Uso de iluminación arquitectónica en la catedral Inmaculada Concepción.	51
3.2. Vaya Linear PARADE S-60 de 72W.	51
3.3. Luminaria POWERSHINE MK2 D.	52
3.4. Fuente conmutada Mean Well.	53
3.5. Codificación.	54

4.1. Revisión de la distribución de los circuitos de iluminación.	57
4.2. Montaje del registrador en el gabinete del cuadro de cargas.	57
4.3. Conexión del equipo de medición de datos conectado al gabinete eléctrico de la Catedral de la Inmaculada Concepción.	58
4.4. Análisis del nivel de voltaje de suministro.	60
4.5. Análisis de las variaciones rápidas del voltaje o Flicker.	60
4.6. Análisis de la distorsión armónica del voltaje.	61
4.7. Análisis del desequilibrio de voltaje.	62
4.8. Voltaje máximo de las líneas de alimentación.	63
4.9. Análisis de los voltajes máximo de las líneas de alimentación.	63
4.10. Corrientes máximas de las líneas de alimentación.	64
4.11. Análisis de las corrientes máximas de las líneas de alimentación.	64
4.12. Corriente máxima total del sistema.	65
4.13. Análisis de la corriente máxima total del sistema.	66
4.14. Corriente y voltaje máximo durante el encendido.	67
4.15. Análisis de la corriente y voltaje máximo durante el encendido.	67
4.16. Lámpara lineal PARADE S de 72W.	68
4.17. Diagrama de bloques de la conexión de los equipos.	69
5.1. Señal de corriente y voltaje durante el encendido de la luminaria LED. . . .	71
5.2. Análisis del voltaje y corriente nominal de la luminaria LED.	71
5.3. Análisis del voltaje durante el encendido de la luminaria.	72
5.4. Análisis del voltaje durante el encendido de la luminaria.	72
5.5. Esquema simplificado de una fuente de alimentación conmutada.	73
5.6. Diagrama de simulación para la corriente de irrupción.	73
5.7. Diagrama de medición en función de la carga.	74
5.8. Etapa de arranque.	75
5.9. Corriente de irrupción.	75
5.10. Diagrama de conexión en paralelo de luminarias LED.	76
5.11. Corriente de irrupción de dos luminarias LED conectadas en paralelo. . . .	77
5.12. Diagrama de conexión con relay de retardo.	78
5.13. Corriente de irrupción de dos luminarias LED con control por relay.	79
5.14. Diagrama de conexión con bypass.	80
5.15. Control de la corriente de entrada por bypass.	81
5.16. Control de voltaje AC de alimentación.	83
5.17. Control de la corriente de irrupción por la regulación de voltaje.	83

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de luminarias LED de alta potencia son el tipo de tecnología más usado a nivel nacional, tanto para uso residencial, como para el uso de alumbrado público ornamental, este tipo de luminarias se caracteriza por tener una mayor eficiencia lumínica y bajo consumo eléctrico y es ideal para decorar fachadas u obras, por lo tanto, los municipios hacen uso de este tipo de tecnología para resaltar las fachadas u obras emblemáticas de cada ciudad [1].

Ante el remplazo a gran escala de las luminarias incandescentes por luminarias LED se han generado inconvenientes al momento del encendido debido a la variación de corriente instantánea provocada por los controladores o fuentes de alimentación [2]. La fundación Iluminar luz y color para Cuenca, dispone de una variedad de luminarias LED de alta potencia para alumbrado arquitectónico, las cuales son usadas para la iluminación de la catedral Inmaculada Concepción (Capítulo 3).

Durante el encendido directo de las luminarias LED de alta potencia, se presenta un problema con la corriente de irrupción, la cual puede alcanzar valores de hasta 100 veces su corriente nominal pudiendo afectar la calidad de energía debido a la variación instantánea de corriente [2]. Las corrientes pico presentes en el encendido directo de las luminarias LED pueden alcanzar valores críticos que pueden afectar a la calidad de energía y el funcionamiento de las protecciones de los circuitos de iluminación en el gabinete del cuadro de carga (Capítulo 4).

La principal falla que presenta esta corriente de irrupción en un circuito de iluminación es la desconexión sus circuitos, por las falsas activaciones de las protecciones. La implementación de luminarias LEDs en paralelo incrementan la corriente de irrupción debido a la cantidad de luminarias que estén conectas a un mismo circuito [3, 4].

Las luminarias LED de alta potencia generan una corriente de arranque que superan los límites nominales de operación [5], por lo cual se proponen sistemas de arranque suave que permitirán reducir la corriente pico a través de un circuito limitador de corriente por sus siglas en inglés ICL tipo activo (Capítulo 5).

Capítulo 1

Problema de Estudio y Objetivos

1.1. Problema de Estudio

Un problema muy común que se presenta en el encendido directo de las luminarias LED de alta potencia, es la corriente de irrupción producida por las fuentes de alimentación conmutadas en función de la potencia y carga que estén conectadas a ella. Esto provoca grandes picos de corriente en el encendido, ocasionando la desconexión de la red, gastos y daños en los dispositivos de iluminación.

Los proveedores de energía suelen ofrecer tarifas reducidas para cantidades de demanda constante y prevista, por lo tanto, si se llegara a infringir este límite se podría tener precios más altos o incluso multas, puesto que los límites de demanda de energía están establecidos contractualmente con los proveedores.

La mayoría de instalaciones no cuentan con sistemas de control de arranque suave para luminarias LED de alta potencia de encendido directo. Estas luminarias son implementadas en obras públicas y privadas, por ello, es necesario proponer un sistema de arranque que permita reducir la corriente de irrupción para alargar la vida útil de las luminarias LED.

1.2. Grupo Objetivo

El desarrollo de este proyecto tiene como finalidad proponer un sistema de arranque suave que permita reducir o controlar la corriente de pico en frío o corriente de irrupción que se produce en el momento del encendido de las luminarias LED de alta potencia y las afecciones que esta pueda tener en la vida útil de las mismas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Proponer un sistema de arranque suave para luminarias ornamentales LED de encendido directo de alta potencia de la Fundación Iluminar Luz y Color para Cuenca.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Clasificar las luminarias ornamentales LED de la Fundación Iluminar Luz y Color para Cuenca en función de las características eléctricas.
2. Analizar la calidad de energía de la red eléctrica para determinar la variación de tensión y corriente durante el arranque de las luminarias LED.
3. Simular el sistema de arranque de las luminarias LED tomando en consideración el modelo de la carga y del sistema de arranque.
4. Diseñar un sistema de arranque suave, incluyendo los elementos de potencia y el sistema de control para las luminarias LED tomando como referencia los resultados obtenidos en los análisis de la calidad de energía y cargas de las luminarias.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1. Tecnología LED

Un diodo LED, es un dispositivo semiconductor que al ser polarizado de manera directa la corriente circula de ánodo al cátodo provocando un efecto llamado electroluminiscencia [6].

La iluminación LED en función de nuevas tecnologías ha ido mejorando a través de los años, de ahí que su implementación se ha diversificado en diferentes sectores a gran escala y este a dominado el mercado. La iluminación LED utiliza energía de corriente continua DC a través de un driver o controlador LED AC-DC, el cual está compuesto por un circuito rectificador, un condensador de filtro, un convertidor DC-DC y un controlador de corriente constante [6].

La tecnología LED cuenta con LEDs de alta potencia que tienen un alto flujo luminoso direccional de gran alcance de proyección el cual se encuentra encapsulado dentro de una resina semirrígida e incorporado dentro de un dispositivo de montaje en superficie (Surface Mount Device-SMD) [7].

Los LEDs de alta potencia se desarrollaron a partir de que la tecnología de encapsulados de alto brillo (superflux) en LEDs no contara con el flujo luminoso necesario para el alumbrado de exteriores debido a que estos no contaban con la potencia necesaria para que los LEDs pudieran alcanzar el flujo luminoso necesario. El incremento de potencia no era viable para estos tipos de LEDs, puesto que, carecían de un disipador calor [8].

En función de que la tecnología superflux no contara con las especificaciones necesarias, se desarrollaron LEDs de alta potencia, estos tipos de LEDs se caracterizan por tener una mejor disipación de calor, un mayor control en la óptica del flujo luminoso y se fabrican en potencias mayores a un vatio (W). Por el momento no existe una estandarización en su construcción física, pues cada vez los fabricantes mejoran sus diseños [8].

2.1.1. Luminarias LED de Alta Potencia

Las luminarias LED de alta potencia son un avance importante dentro del desarrollo lumínico dado que su acción principal es reducir el uso de energía, reemplazando así a las luminarias incandescentes convencionales las cuales desperdician considerables cantidades de energía en forma de calor principalmente. Las luminarias LED son conocidas como la cuarta generación de fuentes de luz y dominan el mercado de la iluminación [9].

Las luminarias LED tienen los mismos componentes que cualquier otro tipo de luminaria, pero su configuración vendrá determinada por la temperatura a la que trabaja cada LED, un aumento de la temperatura reduce la eficacia de la luminaria y reduce la vida útil, por lo que es necesario un buen sistema para la disipación de calor que genera la fuente de luz [7].

La vida útil de las luminarias LED de alta potencia se encuentra en un rango de 50.000 y 100.000 horas, esto va acorde a las especificaciones técnicas de los fabricantes, puesto que se caracterizan por tener una alta eficiencia lumínica, bajo consumo eléctrico y una larga vida útil de hasta 50.000 hrs a 70 % de luminosidad. Este tipo de luminarias son usadas principalmente en alumbrado de exteriores de proyectos arquitectónicos, obras emblemáticas públicas y privadas, etc [7, 10].

Uno de los grandes beneficios que aporta el LED de alta potencia es un consumo muy reducido, lo que ayuda a aumentar la capacidad de ahorro, en comparación con una bombilla incandescente o tradicional que aporta con un 10 % de iluminación y un 90 % calor [7].

Las luminarias LED funcionan exactamente, al contrario: un 90 % es iluminación y tan solo un 10 % se refiere a calor disipado por el equipo, esto quiere decir que, si sustituimos la iluminación que se tiene por luminarias LED, conseguiremos reducir un gran porcentaje de energía eléctrica [7].

2.1.1.1. Modulo Estructural de una Luminaria LED

Un sistema de iluminación LED de alta potencia, consiste en un módulo de iluminación LED ensamblado a partir de una diversidad de LEDs individuales, asociadas con un diseño óptico y un dispositivo de disipador de calor [11].

El sistema de iluminación LED también es conocido como luminaria LED y consta de tres componentes principales como:

- Módulo de iluminación LED
- Cuerpo conductor de calor
- Fuente de alimentación AC/DC
- Disipador de calor

En la figura 2.1 se visualiza la configuración del diagrama de una luminaria LED de alta potencia [11].

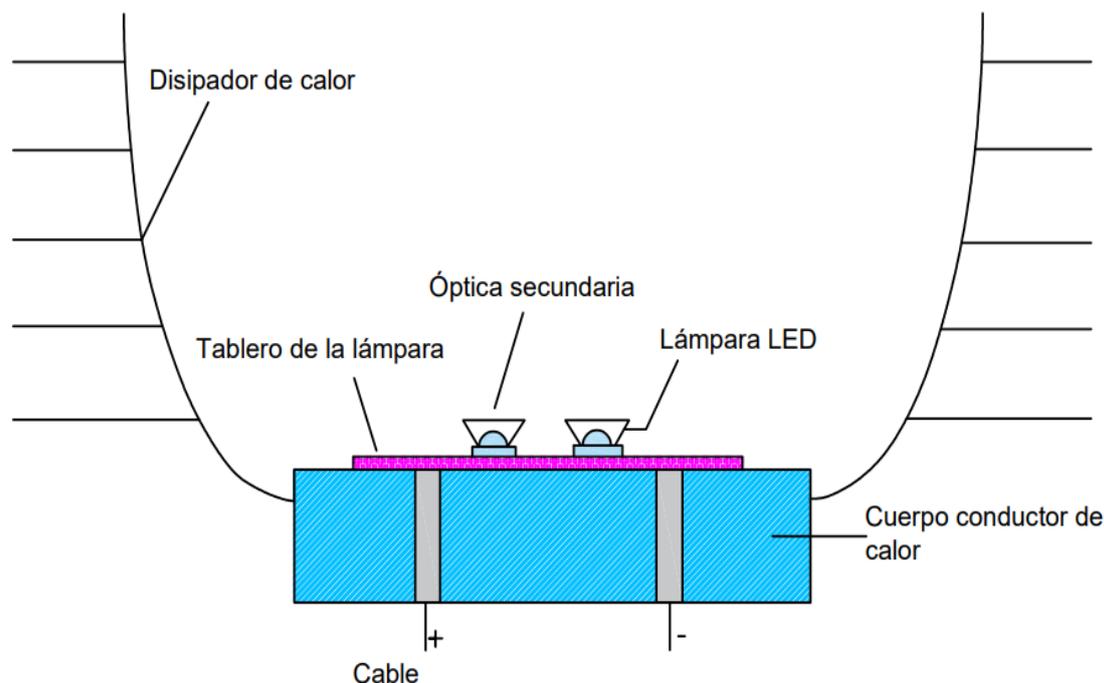


Figura 2.1: Configuración de una luminaria LED de alta potencia.
Fuente: Autor

2.1.1.2. Eficiencia Lumínica

La eficiencia lumínica de las luminarias LED de alta potencia ha aumentado de manera significativa en los últimos años con el objetivo de mejorar la competitividad de las luminarias LED de alta potencia con respecto a los dispositivos de iluminación tradicionales [11, 12].

El LED de potencia tiene una baja eficiencia energética, por lo cual un sistema de iluminación LED de alta potencia necesita disipar el calor del LED a una cantidad que es varias veces mayor que la del dispositivo de iluminación convencional. La disipación de calor es por lo tanto, un tema importante en la tecnología de iluminación LED de alta potencia [11, 12].

Las propiedades ópticas de un sistema de iluminación LED de alta potencia, como el brillo y la cromaticidad, se ven afectadas por la corriente directa del LED y la temperatura del chip LED. El diseño de la luminaria con el dispositivo de disipación de calor, afecta indirectamente a la óptica final [11, 12].

Existen factores en las luminarias LED que es importante considerar como:

- Disipación del calor, puede provocar degradación en la eficacia luminosa [13].
- El rendimiento óptico, incluido la eficiencia óptica [13].
- Corrientes de irrupción en el encendido directo [13].
- La estructura del área a iluminar [13].

2.1.2. Clasificación de la Iluminación LED de Alta Potencia

La iluminación LED en exteriores debe estar acorde a las necesidades lumínicas del entorno, ya que existen algunos tipos de tecnologías LED que presentan diversas funcionalidades para el confort del usuario, por ello se cuentan con diferentes tipos de iluminación como:

2.1.2.1. Iluminación Vial

El propósito de la iluminación vial es proporcionar una visión rápida, precisa y confortable durante las horas de la noche o bajo condiciones de oscuridad. Estas características de visión pueden auxiliar, facilitar y favorecer el tráfico vehicular y peatonal, beneficiando la seguridad de las personas y sus propiedades, así como la infraestructura pública [14].



Figura 2.2: Luminaria vial LED.
Fuente: [15]

2.1.2.2. Iluminación Urbana

El objetivo de la iluminación urbana es brindar visibilidad a la ciudadanía en las zonas y horas mas oscuras con el fin de mejorar la seguridad y el uso de los espacios públicos, de igual manera la iluminación LED puede impactar positivamente en la arquitectura de las ciudades, fortaleciendo los diseños urbanos, la experiencia cultural y la interacción social [14].



Figura 2.3: Luminaria urbana LED.
Fuente: [15]

2.1.2.3. Iluminación Arquitectónica

Ante el desarrollo y el conocimiento de la tecnología LED, se determina a la iluminación arquitectónica como parte esencial de la arquitectura, el diseño de interiores y exteriores. Esta iluminación requiere de la arquitectura e ingeniería eléctrica, debido a que es importante la implementación de diseños de sistemas de iluminación (luz natural, luz eléctrica o ambos) para realzar las obras arquitectónicas [16].



Figura 2.4: Luminaria arquitectónica LED.
Fuente:[15]

La iluminación arquitectónica debe estar acorde con el paisaje y colores del entorno. La cinética del color es tendencia en iluminación exterior e interior de diferentes tipos de fachadas arquitectónicas, como los son [17]:

- Edificios
- Parques
- Estadios deportivos
- Oficinas
- Publicidad

Las oportunidades de iluminación arquitectónica para el exterior son cada vez mas eficientes en la actualidad, además, la estabilidad y flexibilidad de los LEDs permite llevar un diseño único a las fachadas y paisajes urbanos que realzan la estética de las fachadas arquitectónicas [16].

La iluminación arquitectónica es una de las principales preferencias para los diseños de iluminación en ciudades modernistas de la última década. Una de las ventajas de la iluminación arquitectónica es que utiliza luminarias LED especiales y luces de búsqueda, las cuales tienen muchas variaciones de colores en una sola luminaria, permitiendo así iluminar un edificio totalmente o por zonas [18].

La iluminación tradicional en edificios y sectores territoriales consumen mas del 20 % de la generación eléctrica total. Según la relación del desarrollo constante de la infraestructura en el sector urbano, los precios de energía para algunos tipos de iluminación van en aumento, por lo cual es necesario tomar las siguientes consideraciones [18]:

- Dimensiones de la infraestructura a iluminar
- Contrastes existentes entre las fachadas y fondos
- Edificaciones existentes a sus alrededores
- Diseños de las fachadas

2.2. Fuentes de Alimentación Electrónica

Los drivers o controladores electrónicos para luminarias LED se encargan de regular un flujo constante de voltaje o corriente para un correcto funcionamiento del LED o una serie de LEDs que se conectan a la red eléctrica [19].

El funcionamiento principal del driver LED es transformar la tensión de la red eléctrica de corriente AC a corriente continua DC. El driver también regula y mantiene una cantidad constante de corriente, evitando posibles calentamientos en la luminaria LED [19].

2.2.1. Fuente de Alimentación Lineal

Una fuente de alimentación lineal es un circuito electrónico encargado de convertir la corriente de alterna en continua, para lo cual es necesario rectificarla y estabilizarla. Esta

fuente consta principalmente de: un transformador, rectificador, filtro y un estabilizador [20], tal como se presenta en la figura 2.5.

Hoy en día este tipo de fuentes no se utilizan muy a menudo por la gran cantidad de pérdidas de energía que se presentan en sus componentes electrónicos especialmente en el transformador, además para conseguir corrientes elevadas es necesario bobinar el transformador con un alambre de calibre mas grueso lo que ocasiona que el transformador sea muy grande y pesado [20].

En la figura 2.5, se observa el diagrama de bloques de las etapas de funcionamiento de una fuente lineal.

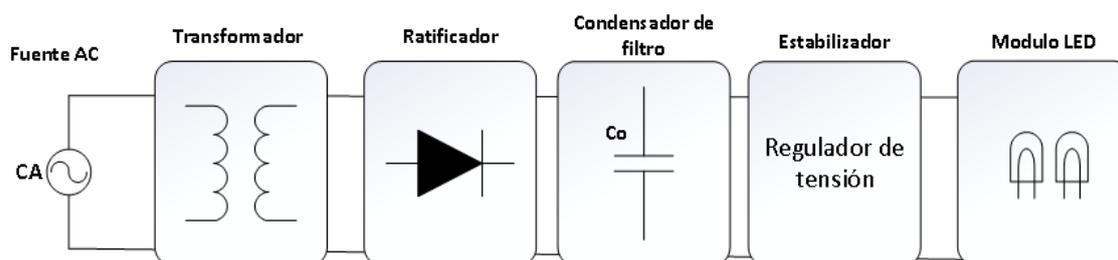


Figura 2.5: Diagrama de bloques de una fuente lineal.

Fuente: Autor

Partiendo del diagrama de la figura 2.5, la cual muestra las etapas de una fuente lineal, se considera al transformador como el dispositivo que puede reducir o elevar la tensión conforme el diseño lo amerite, seguidamente se rectifica con diodos con la intención de tener una señal unidireccional, por lo tanto, la señal de salida cuenta con un valor promedio de DC y un contenido de armónicos que es necesario eliminar [19, 20].

La función del filtro es disminuir o eliminar los componentes de AC que están presentes a la salida del rectificador con el fin de tener una corriente mas estable, usualmente se usan condensadores electrolíticos y en algunos casos se añaden estabilizadores o reguladores de tensión para que la tensión de salida tenga un valor exacto [19, 20].

2.2.2. Fuentes de Alimentación Conmutadas

Las fuentes de alimentación conmutadas hoy en día son las más utilizadas por su versatilidad y eficiencia, a excepción de las fuentes lineales, que trabajan con frecuencias entre 50Hz y 60Hz. Una de las peculiaridades de este tipo de fuentes es la frecuencia de la corriente que pasa de funcionar de 60Hz a 100KHz en adelante, dependiendo del sistema utilizado. Las fuentes conmutadas se basan en usar transistores de potencia que dan paso a la señal de control que varía el ancho de pulso, tomando así solo la energía requerida por la carga [21].

La ventaja que se tiene al trabajar con frecuencias altas es de que reduce el tamaño del transformador puesto que se reduce las pérdidas en núcleo [21]. Para entender el

funcionamiento de una fuente conmutada, debemos separarla en bloques, y analizarlos paso a paso.

En la figura 2.6, se muestra el diagrama de bloques de las etapas de funcionamiento de una fuente conmutada.

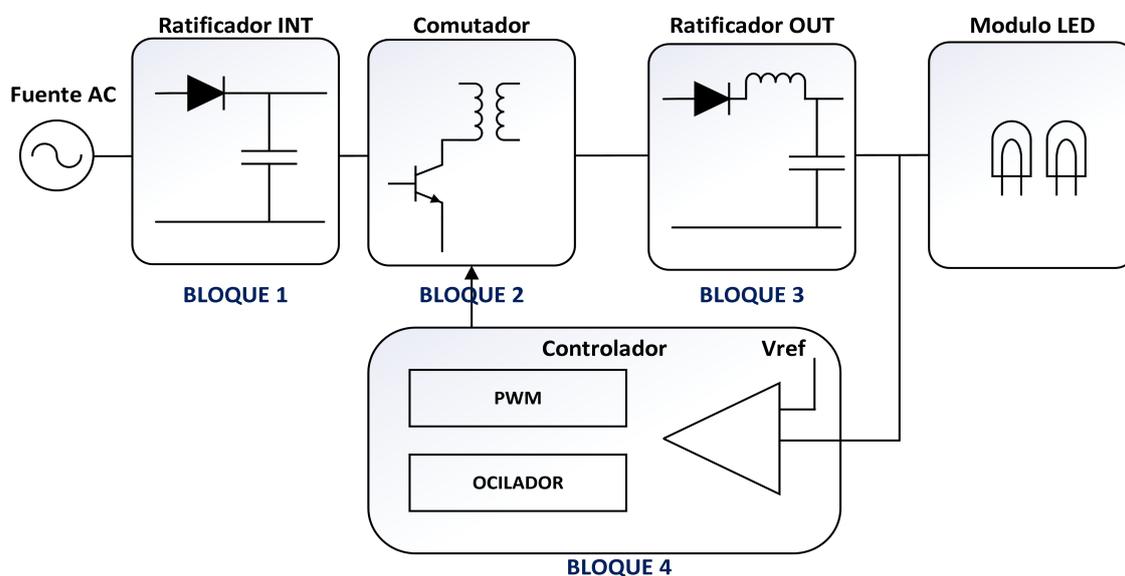


Figura 2.6: Diagrama de bloques de una fuente conmutada.
Fuente: Autor

En el primer bloque rectifica la señal de entrada y filtra de cualquier ruido proveniente de la red, así la tensión es unidireccional continua y pulsante [21]. El segundo bloque se encarga de convertir la señal continua en una onda cuadrada de alta frecuencia a través de transistores los cuales se encargan de cortar y activar el paso de la corriente [21].

En el tercer bloque se rectifica y filtra la salida de alta frecuencia del bloque anterior, garantizando la entrega de una señal continua y pura [21]. El cuarto bloque se encarga de controlar la oscilación del segundo bloque, este bloque consiste de un oscilador de frecuencia fija, una tensión de referencia, un comparador de tensión y un modulador por ancho de pulso por sus siglas en inglés PWM [21].

2.2.2.1. Impacto en la Red Eléctrica

Las fuentes conmutadas son fuentes que actúan por conmutación, es decir, está constituido de un componente que su principal función es abrir y cerrar el paso de la corriente. Estas fuentes conmutadas utilizan dispositivos de electrónicos de potencia como; el transistor bipolar de puerta aislada por sus siglas en inglés IGBT, mosfet o un tiristor [22].

Las fuentes conmutadas presentan inconvenientes que se reflejan en la red eléctrica como: las interferencias electromagnéticas las cuales se dan por las altas frecuencias en las

que trabaja y son producidas a través de la conmutación de los componentes electrónicos [22].

El impacto que más afecta a la red eléctrica es el ruido que producen las alta frecuencia de conmutación, las cuales son mayores que las producidas por las fuentes lineales. Para evitar el exceso de ruido en la red, se utilizan sistemas de protecciones que van desde los filtros capacitivos e inductivos que deben ir colocados tanto en la entrada como en la salida del circuito [22, 23].

2.2.3. Tipos de Control

Los LEDs son dispositivos de corriente constante con una caída de tensión directa, es por ello que para solventar las necesidades cambiantes de los circuitos LEDs, existen controladores que en función del tipo de señal de salida permiten tener una mayor eficiencia en el control del voltaje y corriente [24].

2.2.3.1. Por Voltaje Constante

Un controlador LED de voltaje constante tiene una tensión fija que está entre 12 VDC a 54 VDC. Estos se utilizan para LED que tienen una corriente regulada que requieran una tensión estable [25, 26].

Se debe tener en cuenta que al usar un driver de voltaje constante, la eficiencia es baja en relación lumen/vatio consumido, pero permite al usuario tener una flexibilidad total en la implementación al garantizar un flujo constante de corriente [25]. Este tipo de controladores es ideal para tiras de LEDs decorativas y no es recomendable para atenuación de luz [25, 26].

2.2.3.2. Por Corriente Constante

Un controlador LED de corriente constante varia la tensión para mantener un suministro de corriente, garantizando así que ante fluctuaciones de tensión este garantice la corriente necesaria al LED [25, 26].

Los controladores de corriente constante están diseñados para LEDs que necesiten una corriente de salida fija y voltajes variables, para este tipo de controladores normalmente los LEDs se conectan en serie. Una ventaja de este tipo de drivers es que proporcionan un control mas eficiente de la energía disipada y de la detección de errores, es ideal para atenuación de luces [25, 26].

En la figura 2.7, se observa un controlador comercial de voltaje y corriente constante.



Figura 2.7: Fuente conmutada Mean Well.
Fuente: [25]

La tensión y la corriente de funcionamiento están especificadas en la tabla técnica por el fabricante de la luminaria o dispositivo eléctrico, ya que estos dos datos permiten seleccionar correctamente el tipo de control.

2.3. Corriente de Irrupción Causada por Luminarias LED

Las luminarias LED de baja y alta potencia constan de una fuente de alimentación conmutada y durante su funcionamiento tienen una corriente de entrada inicial la cual fluye hacia la entrada sin ningún mecanismo de control en su magnitud [27].

La corriente de irrupción conocida en inglés como inrush current, es la sobrecorriente de entrada instantánea que se produce por una fuente de alimentación o un driver eléctrico en el momento del encendido. Esta sobrecorriente se da por las altas corrientes iniciales, necesarias para cargar a los condensadores y los inductores de los transformadores de los equipos de alimentación [2].

Al encenderse la luminaria, los condensadores descargados en las fuentes de alimentación ofrecen una impedancia baja que permite que fluyan altas corrientes hacia el circuito a medida que se cargan desde cero hasta sus valores máximos [2].

Hay que tener presente que el valor pico de la sobrecorriente de encendido por luminarias LED puede ser hasta 100 veces más que la corriente nominal [2]. Esta corriente aparece en el momento del encendido y desaparece en el segundo ciclo de onda llegando a estabilizarse a sus valores nominales de operación. Si no se limitan las altas corrientes, estas pueden dañar a los equipos, además de producir irregularidades en la señal de voltaje en la línea de alimentación [28].

2.3.1. Corriente de Irrupción Según el Ángulo de Fase

La magnitud del pico de la corriente de irrupción en el momento del arranque depende del ángulo de fase de la onda sinusoidal AC. El peor de los casos ocurre si el ángulo de fase de la onda sinusoidal es 90° , el voltaje en el lado primario de la fuente de alimentación puede aumentar de 0 a 300 VAC en una red de 230 VAC casi instantáneamente [3, 27]. En la figura 2.8, se muestra el pico de corriente cuando el ángulo de fase de la onda sinusoidal de AC es 90° .

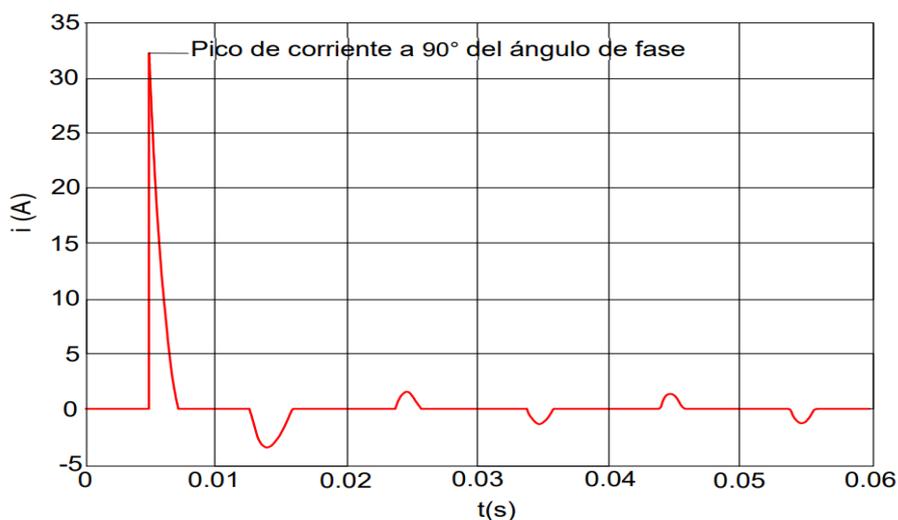


Figura 2.8: Pico de corriente máxima a 90° del ángulo de fase AC.
Fuente: Autor

Si el ángulo de fase de la onda sinusoidal de AC es 0° , la corriente de irrupción de todas las cargas capacitivas tienden a disminuir considerablemente [3], en la figura 2.9, se observar el pico de corriente cuando el ángulo de fase de la onda sinusoidal de AC es 0° .

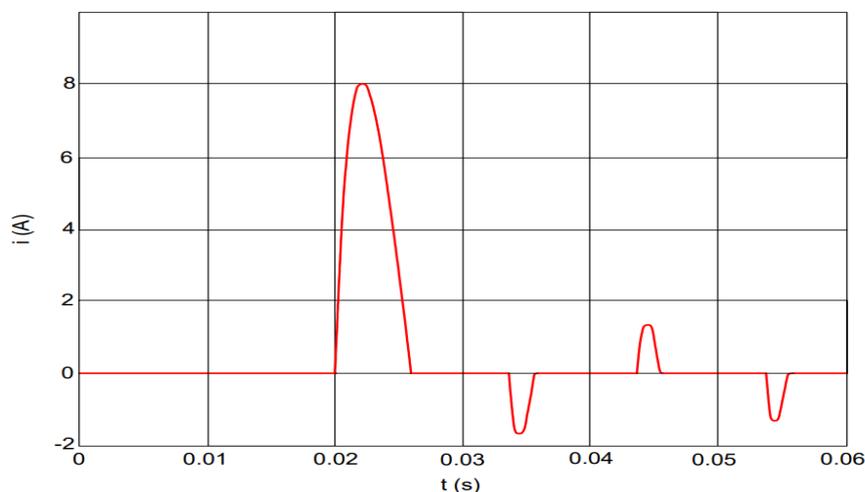


Figura 2.9: Pico de corriente mínima a 0° del ángulo de fase AC.
Fuente: Autor

En estos dos casos de encendido hay una corriente de irrupción y su amplitud depende en gran medida del momento de encendido [27], esto significa que la corriente de irrupción se ve afectada principalmente por el ángulo de fase del onda sinusoidal [3].

En la figura 2.10, se visualizan los parámetros a considerar para el análisis de la corriente de irrupción:

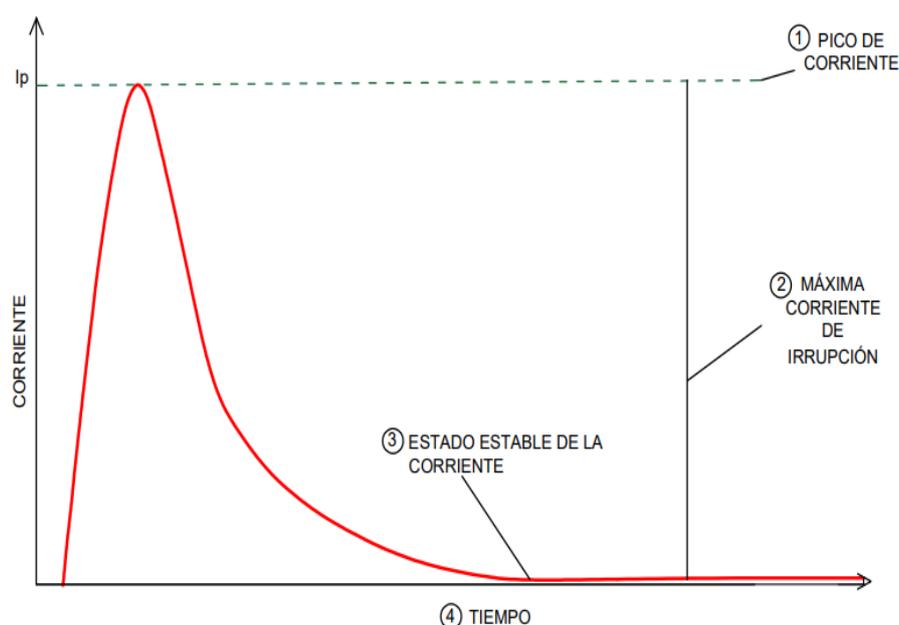


Figura 2.10: Parámetros de análisis de la corriente de irrupción.
Fuente: Autor

Descripción de los parámetros de la corriente pico:

1. **Pico de corriente (I_{peak});** es el valor máximo de la corriente.
2. **Máxima corriente de irrupción;** es la corriente máxima que consume la carga en el encendido.
3. **Estado estable de la corriente;** es la corriente nominal tras el arranque de la carga.
4. **Tiempo;** es el tiempo de estabilización de la corriente, normalmente se demora entre el primer y segundo ciclo de onda.

2.3.2. Duración de la Corriente de Irrupción

La corriente máxima de irrupción puede superar 100 veces la corriente nominal, donde el tiempo de ocurrencia del pico de la corriente se da en el primer ciclo de onda [29].

El valor de la amplitud de la corriente de irrupción se debe considerar como parte de una referencia para comparar con el valor nominal de la señal estabilizada [30].

En la figura 2.11, se puede observar la duración de la corriente de irrupción, donde Δt es la duración del pulso de la corriente y es medida a la mitad de la corriente de irrupción (t_{h50}), comúnmente se encuentra en el valor de los μs , pero en ocasiones existen dispositivos que presentan una duración en ms.

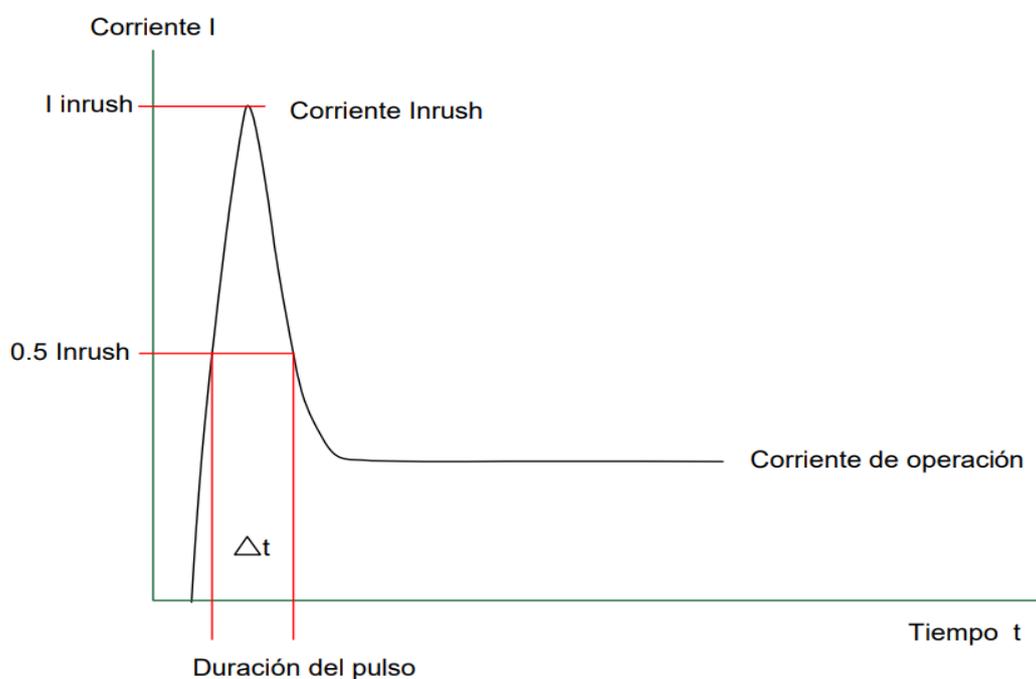


Figura 2.11: Parámetros de medición de la corriente de irrupción.

Fuente: Autor

Al encenderse la luminaria, puede originarse varios picos de corriente de duración y amplitud diferentes, lo cual indican el aumento múltiple de corto tiempo de la corriente de irrupción [30].

2.3.3. Medición de la Corriente de Irrupción

Por la variedad de fabricantes que existen en el mercado no es posible calcular la corriente de irrupción de manera exacta ya que cada fabricante usa modelos y especificaciones diferentes [31, 32].

La corriente de irrupción es necesario considerarla para drivers LED con una potencia máxima de 100 W o mas. La corriente de irrupción en los controladores LED con una potencia inferior a 100 W es insignificante, por lo que para estos controladores se puede utilizar la corriente nominal para dimensionar la protecciones necesarias [32].

Se debe considerar el valor de la corriente de arranque o irrupción de la luminaria LED que se vaya a utilizar, esta información normalmente suele aparecer en las hojas de las características técnicas puestas por el fabricante.

Debido a la variedad de fabricantes se presentan corrientes de irrupción mas altas en controladores menores a 100 W, por lo tanto es importante tener presente la corriente de irrupción de cualquier luminaria LED. En caso de no obtener este dato en la ficha técnica de la luminaria se deberá solicitar la ficha técnica del controlador [32].

2.3.4. Impactos y Efectos

Debido al comportamiento que presentan las luminarias LEDs por sus fuentes de alimentación, las corrientes picos que en la mayoría de veces no presentan ningún problema, las dificultades suelen presentarse en cargas de alta potencia conectadas en paralelo donde su corriente de arranque se incrementa y perjudica las protecciones de los circuitos [3].

Disparo del Magnetotérmico: Las protecciones usadas en instalaciones eléctricas más comunes son los magnetotérmicos o breakers, estos dispositivos tienen dos mecanismos de protección: la parte magnética y la térmica. La parte magnética se activa ante un calentamiento producido por una sobre carga la cual está relacionada en función del tiempo y la corriente. El segundo mecanismo es el térmico el cual actúa contra cortocircuitos, este se activa en función de la corriente y se dispara muy rápidamente [4, 33].

El segundo mecanismo de protección se ve afectado por los picos de corriente de entrada, lo que provoca su activación, como consecuencia se produce la desconexión del circuito, puesto que, la corriente de entrada o arranque supera la corriente nominal para la que fue diseñado [4, 33].

Desgaste de la Vida Útil: Las corrientes de irrupción, incrementan la posibilidad de fallo de las luminarias LED, puesto que estas son sensibles a cambios de corrientes. Estas sobrecorrientes que se presentan por perturbaciones inherentes a la red o por el mismo arranque de las luminarias lo que provocan que la vida útil de los dispositivos electrónicos disminuyan considerablemente [4, 33].

Desconexión de los Circuito: Las altas intensidades de corriente en los arranques de encendido están provocando desconexiones no deseadas en los cuadros de carga, lo que ocasionan inconvenientes al momento de dimensionar las protecciones necesarias para los equipos. Además, se ha detectado un aumento desproporcionado de la distorsión armónica en la red por cargas LED de alta potencia [3, 4].

La corriente pico de una luminaria LED normalmente no causa ningún problema de disparo en las protecciones, ya que, sólo duran unos microsegundos, al encender varias luminarias al mismo tiempo o al usar una fuente de alimentación con mayor potencia [3, 4].

La conexión en paralelo de luminarias LED incrementa la corriente de irrupción, las corrientes de entrada se suman provocando una alta corriente de arranque, esto puede provocar problemas en la activación de las protecciones en el cuadro de cargas [3].

2.4. Calidad de Energía

La calidad de energía se puede definir como la energía que se suministra a los dispositivos y equipos para obtener un buen rendimiento de manera continua sin que haya problemas de funcionamiento y fallas dentro del sistema eléctrico, una buena calidad de energía no debe presentar: [34]:

- Interrupciones en la red eléctrica
- Existir deformaciones de la forma de onda por armónicos
- Variaciones del valor rms

En las redes eléctricas los sistemas no lineales ocasionalmente están representados por los semiconductores de potencia y por la saturación de los núcleos de transformadores, estos factores producen gran distorsión sobre la corriente que demandan, ocasionando que la onda senoidal del voltaje también llegue a distorsionarse [35].

En las cargas no lineales su impedancia varía durante todo el ciclo de voltaje, es decir, la onda sinusoidal de corriente no es proporcional a la onda sinusoidal de voltaje, es por ello que la señal de corriente y voltaje no tienen una relación directa, a diferencia de las cargas lineales que sí la tienen [35].

Las cargas variantes en el tiempo de las cargas no lineales distorsionan las formas de onda de la tensión y corriente en estado estable provocando la aparición de las componentes armónicas ocasionando contaminación a la red y a su vez puede afectar incluso a otros usuarios [34].

2.4.1. Perturbaciones Presentes en la Red Eléctrica

Los sistemas eléctricos normalmente presentan perturbaciones que son debidas a causas externas ocasionadas por el medio ambiente o internas como: los cortocircuitos o las maniobras de elementos de la red que a su vez generan irregularidades en la calidad de energía, las cuales pueden repercutir en el funcionamiento y en la vida útil de los dispositivos electrónicos de las luminarias LED.

Perturbaciones propias de la red: Entre los efectos que producen las perturbaciones inherentes al sistema, ocasionadas durante la generación y transmisión de la electricidad, por desperfectos de los materiales, terminales en mal estado o por descargas eléctricas, entre otros, se encuentra: fluctuaciones permanentes y momentáneas de tensión, transitorios de tensión inherentes de la red o causados por descargas atmosféricas, entre otros [36].

Perturbaciones externas a la red: Generalmente son producidas por los usuarios son pequeñas en consideración a las ocasionadas por la misma red, la suma de las perturbaciones generadas por los usuarios y las propias de la red se complementan provocando irregularidades en la señal de voltaje y corriente [36].

Entre las causas de las perturbaciones externas se encuentran cargas inductivas que pueden ser motores, reactancias, cargas no lineales los cuales pueden ser reguladores de tensión, fuentes de alimentación conmutadas, variadores de velocidad, etc [36]. Los efectos que producen las perturbaciones externas a la red son: impulsos de tensión, distorsión armónica total o por sus siglas en inglés (THD), desequilibrios de tensión, variaciones de frecuencia, variaciones lentas de tensión, fluctuaciones de tensión (Flicker) [36].

2.4.2. Efectos de la Red Eléctrica en la Señal de Tensión y Corriente

Las perturbaciones generadas por la red eléctrica presentan desbalances en la señal de tensión y corriente, lo que provoca que existan fallas en el sistema y en el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, disminuyendo así la vida útil de los mismos, es importante conocer estas variaciones y el origen que las causan para determinar el nivel de calidad de energía.

2.4.2.1. Variaciones de Tensión

Las variaciones de tensión son producidas por fallas en el sistema eléctrico y por altas corrientes de irrupción de una carga. Existen dos tipos de variaciones de tensión, la lenta y la rápida [37].

Las variaciones lentas llamadas variaciones de voltaje de suministro, se dan en tiempos de minutos. La norma IEC en relación al control de la calidad de la energía (IEC 61000-4-30), dice que el voltaje rms se calcula en una rango de 10 minutos (este tiempo es muy usado para realizar cálculos de voltaje rms) [37].

Las variaciones rápidas llamadas también parpadeo de voltaje, tienen un rango de tiempo de parpadeo de pocos segundos. Las normas de calidad de voltaje utilizados para estos rangos de tiempo son de la IEC 61000-4-15 e IEEE 1453 [37].

2.4.2.2. Distorsión de la Forma de Onda

La distorsión de la forma de onda, es la distorsión en estado estable de la onda sinusoidal ideal, donde la frecuencia esta entre 50-60 Hz. Esta distorsión se da cuando existen varios factores que afectan de manera directa a la onda como [37]:

- Ruido
- Armónicos
- Desplazamiento de la corriente continua
- Perturbaciones periódicas de tensión

Ruido: Son señales eléctricas provocadas por la mala puesta a tierra, campos magnéticos en los conductores, por dispositivos eléctricos y electrónicos. Estas señales eléctricas no son deseables y están sobrepuestas en las señales de tensión y corriente, como se ve en la figura 2.12 [34].

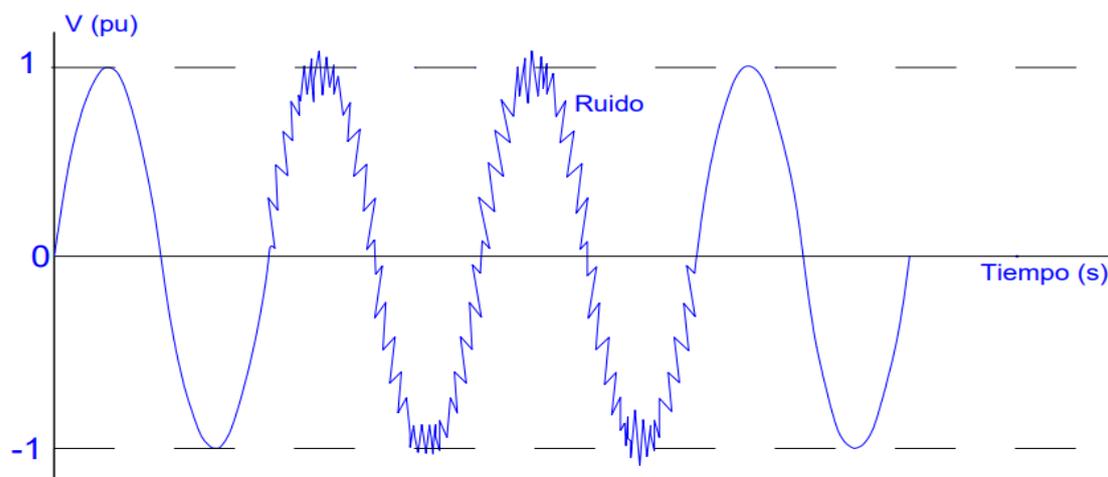


Figura 2.12: Señal de tensión con ruido.

Fuente: [34]

En los sistemas electrónicos de potencia, el ruido es causado por rectificadores de estado sólido, fuentes conmutadas, etc [34].

Armónicos: La distorsión armónica es producida por cargas que se basan en la electrónica de potencia y por características eléctricas no lineales. Los niveles de distorsión armónica van acorde a la magnitud y ángulo de fase de cada elemento individual. Para determinar la forma de onda de la tensión y corriente se cuenta con dos ecuaciones que suman las señales que reconstruyen la función de análisis del THD que va acorde a la serie de Fourier como:

$$v(t) = V_1 \cos(\omega t + \theta_1) + V_2 \cos(\omega t + \theta_2) + V_3 \cos(\omega t + \theta_3) + \dots$$

$$i(t) = I_1 \cos(\omega t + \phi_1) + I_2 \cos(\omega t + \phi_2) + I_3 \cos(\omega t + \phi_3) + \dots$$

Donde el valor de las variables son:

- V_1, I_1 : Valor pico fundamental de la tensión y corriente
- θ_1, ϕ_1 : Son los valores de la tensión y corriente de la n-ésima armónica

En la siguiente figura 2.13 se puede apreciar el primer ciclo de onda de la onda de tensión que está contaminada por la distorsión armónica [34].

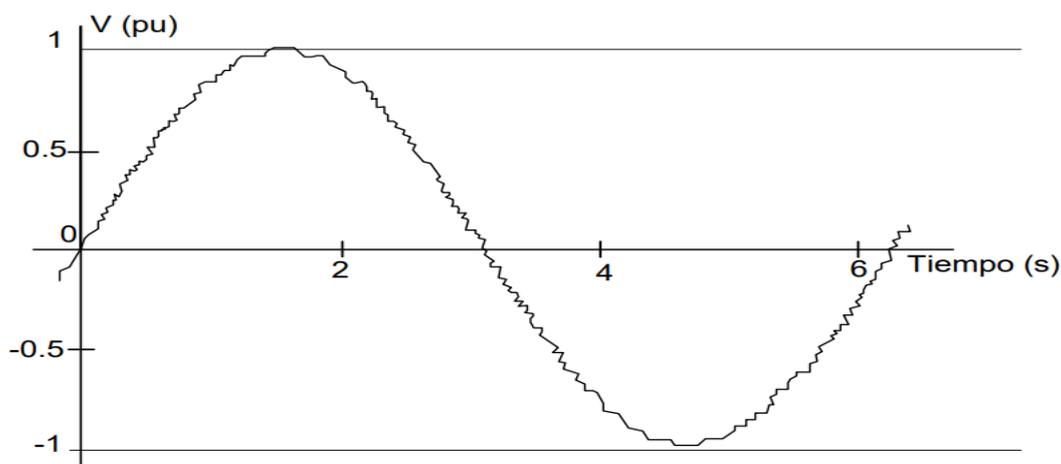


Figura 2.13: Forma de onda contaminada con distorsión armónica.
Fuente: [34]

Desplazamiento de DC: Cuando hay tensión y corriente continua dentro de un sistema de alimentación de corriente alterna, se determina que hay un desplazamiento DC. Esto se debe a la rectificación de media onda por fuentes conmutadas que disponen de convertidores que utilizan elementos de electrónica de potencia [34].

En la figura 2.14, se visualiza el desplazamiento de una onda sinusoidal por un componente de DC, la señal de azul está desplazada de DC [34].

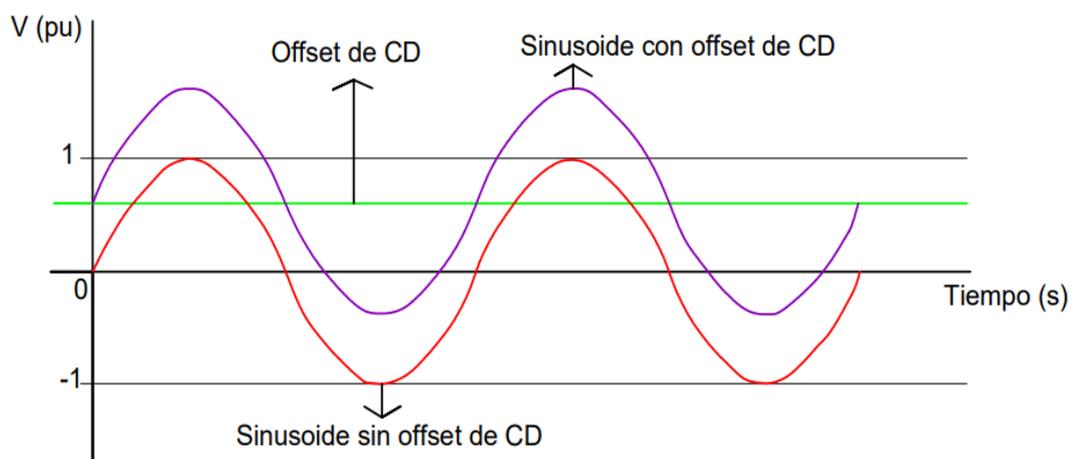


Figura 2.14: Forma de onda sinusoidal con desplazamiento DC.
Fuente: [34]

Perturbación periódica de tensión: Son perturbaciones de tensión que se dan en el arranque por dispositivos electrónicos de potencia cuando se conmuta la corriente de una fase a otra.

En la figura 2.15, se puede apreciar un ejemplo de la forma de onda que es distorsionada por este tipo de perturbación[34].

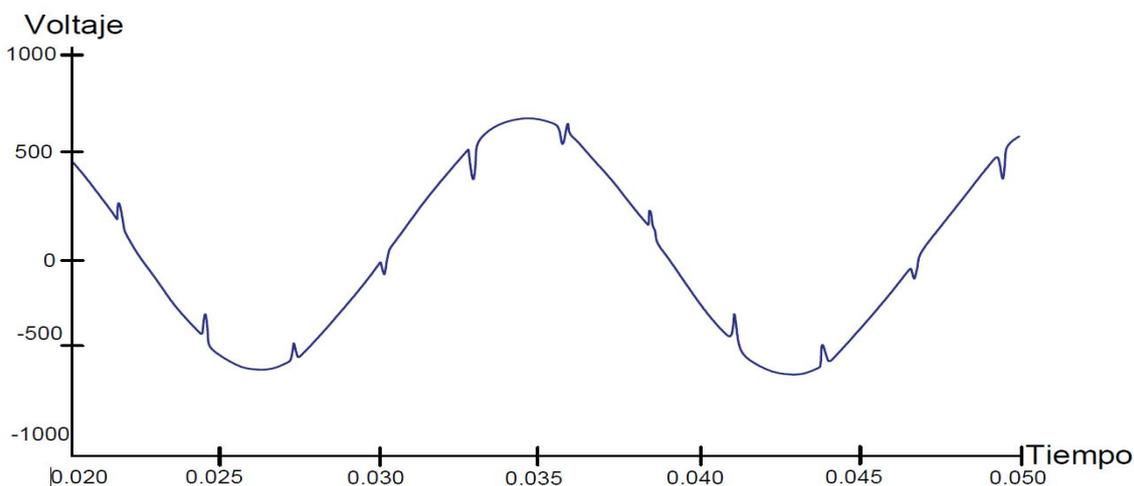


Figura 2.15: Perturbación periódica de tensión causado por la operación de un convertidor.
Fuente: [34].

2.4.2.3. Transitorios en los Sistemas Eléctricos

Se conoce como régimen transitorio a la respuesta momentánea que presenta un circuito eléctrico a través del tiempo en contra posición del régimen permanente, el cual se mantiene constante siempre que no se altere el circuito o la excitación del mismo [34].

Los transitorios son sobretensiones instantáneas de muy poco tiempo de durabilidad y es el problema mas común que perjudica a la potencia, existen dos tipos de señales transitorias de tensión y/o corriente [34].

Transitorio impulsivo: Es el cambio imprevisto o distinto que tiene una frecuencia de operación (60 Hz), su duración de tiempo es menor a medio ciclo. La causa principal para que se produzcan estos transitorios impulsivos son los rayos, también se dan cuando se tiene una mala puesta a tierra, maniobras con interruptores y cuando se activan cargas inductivas, etc [34].

Transitorio oscilatorio: Es el cambio imprevisto que sufre la frecuencia de operación de (60 Hz), donde la tensión o corriente tiene valores momentáneos pudiendo ser de polaridad positiva y negativa que cambian de manera instantánea [34].

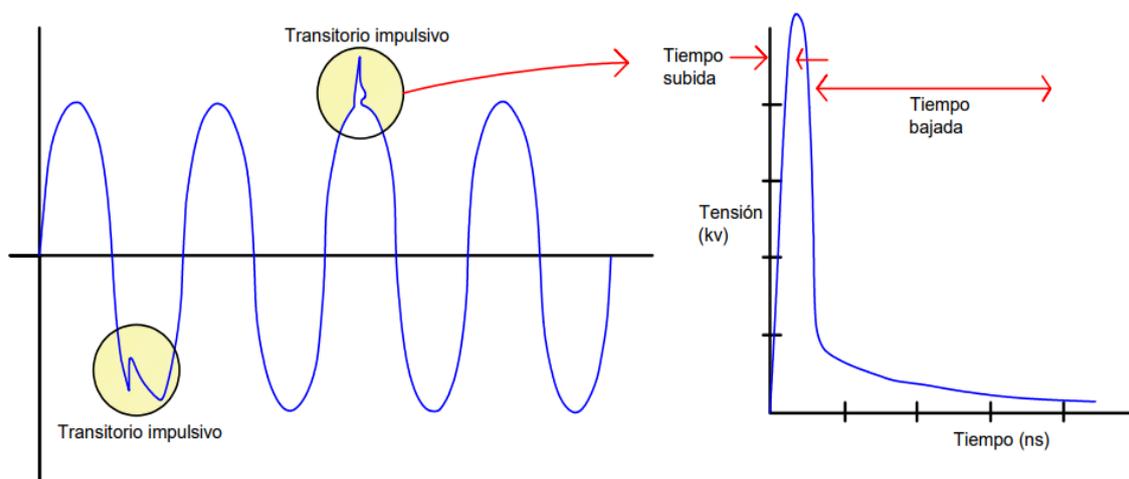


Figura 2.16: Transitorio impulsivo de voltaje.
Fuente: [34]

2.4.3. Características del Registrador de Datos 1735 Power Logger (Fluke)

Para la obtención de datos de la calidad de energía del cuadro de carga de la catedral Inmaculada Concepción, se contó con un equipo 1735 Power Logger de la marca Fluke, el cual fue prestado por el laboratorio de electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS).

El equipo 1735 Power Logger realiza mediciones y estudios de tensión, corriente, potencia y armónicos. Este equipo también es llamado registrador, es una herramienta investigativa de calidad de la potencia ya que puede registrar cualquier tipo de anomalía dentro de la calidad del suministro de tensión en cualquier punto de una red de distribución [38].



Figura 2.17: Equipo 1735 Power Logger - Fluke.
Fuente: [38]

Este equipo es muy utilizado por ingenieros eléctricos dentro de la industria y por instaladores eléctricos cuya función se deriva a investigar y solucionar problemas dentro del sistema de distribución eléctrico. Para el buen uso del registrador, hay que tener presente lo siguiente [38]:

- El registrador puede ser utilizado y manipulado por personal calificado y que entiendan el equipo con el que están trabajando [38].
- Evitar realizar manipulaciones en líneas energizadas, siempre hay que respetar los códigos de seguridad [38].
- Es importante quitar todos los conductores de prueba del registrador en el momento de realizar el cambio de batería, para evitar descargas eléctricas [38].
- Usar solo sondas de corriente especificadas. En caso de utilizar sondas de corriente flexibles, es importante llevar guantes de protección.
- Siempre proteger el equipo de agua y la humedad en el momento de realizar mediciones [38].
- Es importante conectar al equipo los conductores y sondas de prueba de corriente y tensión antes de suministrar carga eléctrica, así se evitan descargas eléctricas [38].

El analizador tiene funciones de medición que van acorde a la necesidad del proyecto, por ello se identifican varias de ellas como [38]:

Medir tensión y corriente: Esta función permite registrar y visualizar la tensión y corriente en el mismo tiempo al igual que la frecuencia.

Alcance: La función de alcance visualiza las tensiones, corrientes y el ángulo de fase θ , con la función alcance se obtienen imágenes en alta resolución ya sea de la señal de onda de corriente, tensión, y sus distorsiones [38].

Armónicos: En esta función se determina el orden de los armónicos de las tensiones sinusoidales con una frecuencia que corresponde a un valor de muestreo [38].

Alimentación: Muestra los resultados de la potencia transferida y al mismo tiempo puede medir la potencia activa, reactiva, aparente al igual que el factor de potencia [38].

2.4.3.1. Diagramas de Fase del Registrador de Energía

El equipo registrador, cuenta con cinco tipos de conexiones a la red según la necesidad y disponibilidad de las líneas de alimentación que se dispongan, los tres tipos de conexiones más usados y comunes son [38]:

Conexión de fase única: Al realizar esta conexión, se tiene presente la nomenclatura de las líneas de alimentación, es decir; R, S, T que corresponden a las líneas de tensión y N al neutro. Ahora para la conexión se conectan dos sondas de corriente L1 en R y N

en neutro y todas las sondas de tensión (L1, L2, L3) se conectan a la misma línea R y solamente la sonda de tensión N a neutro, como se puede visualizar en la siguiente figura 2.18 [38].

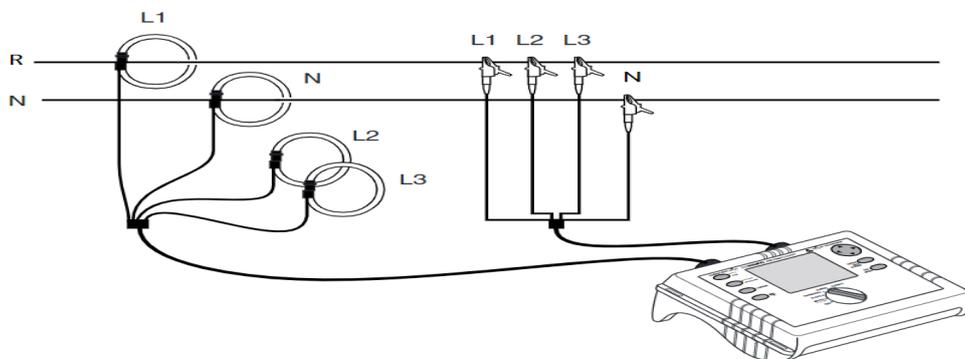


Figura 2.18: Conexión de fase única.
Fuente: Autor

Conexión de fase dividida: En esta conexión se conectan dos de las tres sondas de corriente como: L1 a R, L2 a S y la N a neutro, mientras que las sondas de tensión van conectadas todas con este tipo de conexión; la sonda de tensión L1 y L3 van conectados a la línea R, L2 a la línea S y N va conectada a neutro, como se muestra en la siguiente figura 2.19 [38]:

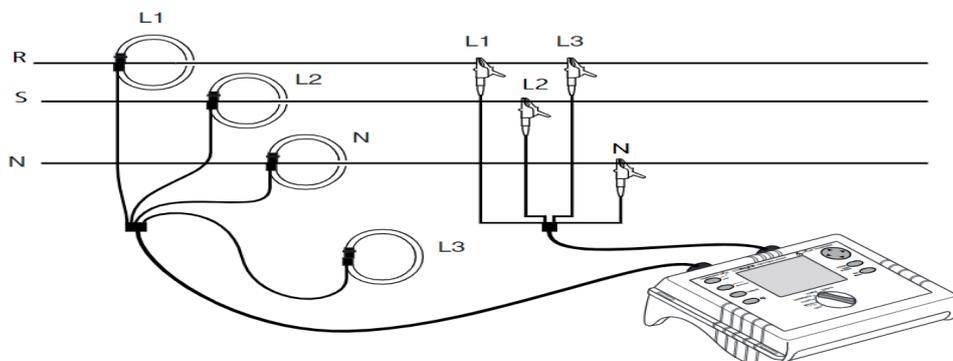


Figura 2.19: Conexión de fase dividida.
Fuente: Autor

Conexión de red trifásica: La conexión de la red trifásica consta en conectar todas las sondas a cada línea de alimentación, incluido el neutro, para ello, las sondas de corriente deben estar distribuidas de la siguiente manera; la L1 debe estar conectado a la R, la L2 a S, la L3 a T y N a neutro. Las sondas de tensión de igual manera, la L1 a la línea de alimentación R, la L2 a S, la L3 a T y N al neutro.

En la siguiente figura 2.20, se puede ver más a detalle la conexión [38].

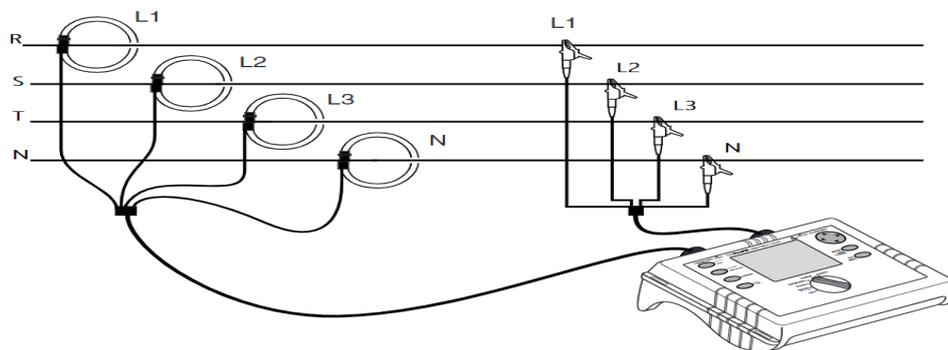


Figura 2.20: Conexión de estrella trifásica.

Fuente: Autor

2.5. Interruptores Automáticos de Protección para Iluminación LEDs

Los criterios para la selección fueron desarrollados por el Sector de Sistemas Eléctricos para la construcción BEAMMA en función de la norma BS EN IEC 63129 (Determinación de las características de la corriente de irrupción de los productos de iluminación). Esta guía de selección proporcionará a los instaladores y usuarios una orientación sobre la selección de interruptores automáticos en miniatura o por sus siglas en inglés MCB e interruptor automático de corriente residual con protección de sobre-corriente RCBO.

2.5.1. Aplicación de los Interruptores Automáticos

Los interruptores automáticos se seleccionan principalmente para la protección contra sobrecorrientes del sistema, en algunos casos, para evitar un funcionamiento involuntario. Hay que tener en cuenta los valores de corriente pico de las luminarias LED para evitar el funcionamiento involuntario de los dispositivos de protección por corrientes de entrada [39].

2.5.2. Corriente de Entrada de las Luminarias LED

Cuando se encienden las luminarias LED estas pueden provocar un pico de corriente transitoria inicial de varios cientos de veces superior a su corriente de la carga durante el funcionamiento normal, esta corriente es más conocida como corriente de irrupción o corriente de pico en frío; esto se agrava con la conmutación simultánea de múltiples luces LEDs [39].

Los fabricantes de iluminación LED proporcionan datos sobre la corriente de entrada máxima y la duración de la misma puesto que, es importante conocer la corriente máxima

(I_{peak}) y la duración del pico de corriente (t_{H50}) la cual se mide al 50 % de la corriente máxima ($I_{peak} \cdot 0.5$) según lo estipulado en la norma BS EN IEC 63129 [39].

2.5.3. Tipos de Curvas de los Interruptores Automáticos de Protección

Los sistemas de iluminación a gran escala necesitan una buena fiabilidad del suministro de energía eléctrica, dentro de la buena fiabilidad del suministro de energía se encuentra el manejo correcto y eficaz de los dispositivos de protección comandados para actuar en casos de fallas [40].

Los ajustes de las protecciones deben tener un perfil de seguridad excelente tanto en la corriente de carga normal y de entrada la cual se puede dar en el encendido del equipo [40].

Se ha determinado que la corriente de irrupción o arranque se encuentra cerca del valor de cortocircuito y no es reconocida en la mayoría de los casos por los dispositivos de protección. Esto provoca problemas en la activación de las protecciones en el lado de media tensión del transformador [40].

Las funciones de protección comunes a nivel de alimentador de BT son:

- Protección contra sobrecorriente instantánea
- Protección contra sobrecorriente con característica inversa
- Protección de corrientes de fuga [41]

2.5.4. Curvas de Disparo para Interruptores de Baja Tensión

Existen curvas de disparo adecuadas a los diferentes tipos de cargas, estas curvas son el resultado de la reacción del tiempo de actuación del interruptor de protección cuando es sometido a diferentes valores de corrientes frente a la corriente nominal del equipo [42].

En el arranque de un circuito que consta de varias cargas se puede presentar una corriente pico, esta corriente de arranque es muy elevada a la corriente nominal de todo el circuito ya que, puede presentar problemas en la activación de las protecciones [40].

Un interruptor automático contiene dos protecciones independientes [40]:

- Protección contra sobrecargas: A mayor corriente el tiempo de actuación es corto.
- Protección contra cortocircuitos: A un cierto valor de corriente de falla la protección actúa, siempre en el mismo tiempo. Las normas IEC 60947-2 y 60898 fijan las características de disparo de las protecciones de los interruptores automáticos [40].

Dependiendo de los límites que tenga la curva característica de un interruptor de protección será su actuación, ante el circuito que se requiera proteger hay una variedad de curvas características como [40]:

- Curva B
- Curva C
- Curva D

2.5.4.1. Curva B

La curva de ruptura B, para un interruptor de protección tipo B, indica que su corriente de ruptura en su zona magnética está entre tres y cinco veces la corriente nominal o 1.1 y 1.4 veces la corriente nominal en la zona térmica, su función es actuar instantáneamente [42].

Estos interruptores de curva B son utilizados en circuitos eléctricos en que el cortocircuito es de baja intensidad como [40]:

- Cargas resistivas (duchas, planchas, lámparas incandescentes, etc.).
- En el sector residencial, cuando la demanda de corriente de arranque del equipo es baja.

En la figura 2.21, se visualiza el rango de activación de un interruptor automático tipo B.

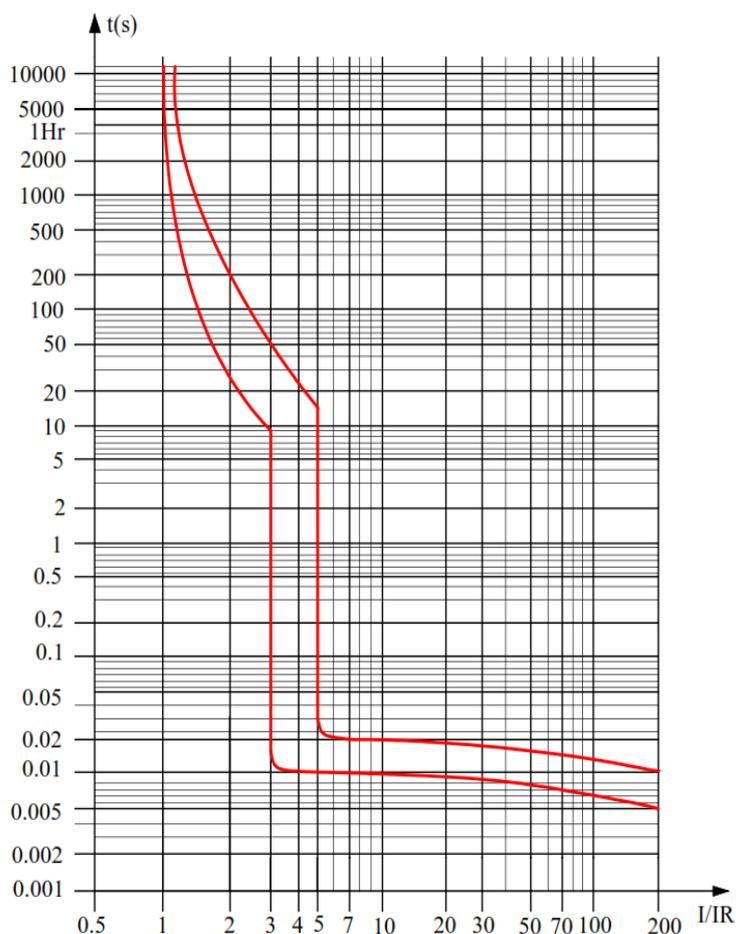


Figura 2.21: Curva B.
Fuente: [42]

2.5.4.2. Curva C

La curva de ruptura C, para un interruptor de protección tipo C, indica que su corriente de ruptura en su zona magnética está entre cinco y diez veces la corriente nominal o 1.13 y 1.43 veces la corriente nominal en la zona térmica [40].

Estos interruptores de curva C son utilizados en circuitos eléctricos en que la demanda de corriente de arranque alcanza valor medio, como:

- Las cargas inductivas, (motores eléctricos, compresores para refrigeración y unidades condensadoras, entre otros equipos).

En la figura 2.22, se visualiza el rango de activación de un interruptor automático tipo C.

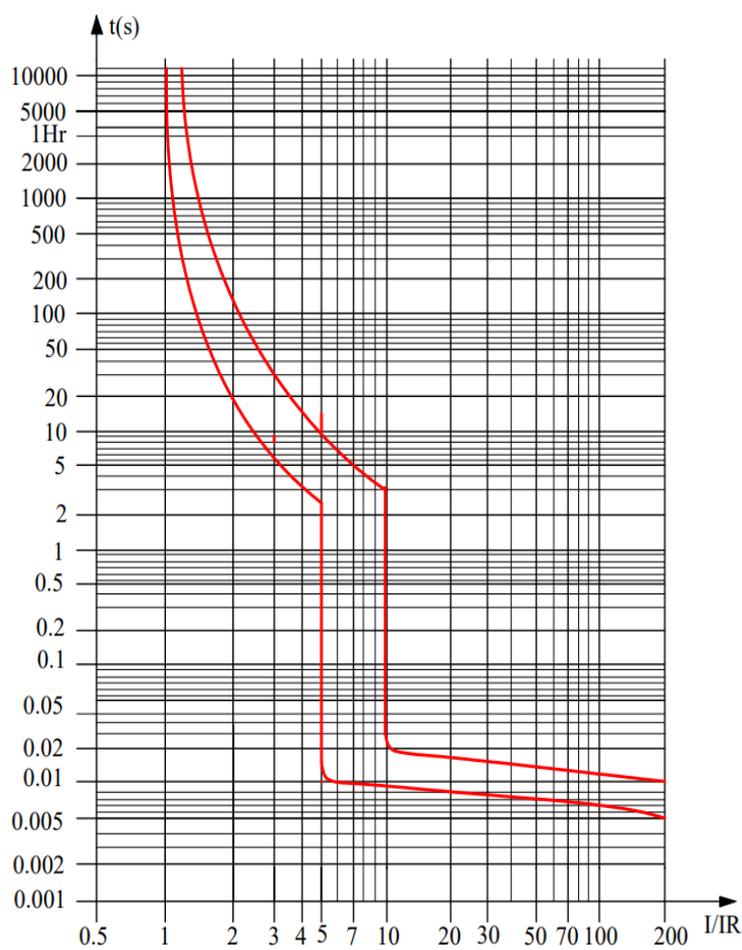


Figura 2.22: Curva C.
Fuente: [42]

2.5.4.3. Curva D

La curva de ruptura D, para un interruptor de protección tipo D, indica que su corriente de ruptura en su zona magnética está entre 10 y 20 veces la corriente nominal [40, 42].

Estos interruptores de curva D son utilizados en circuitos eléctricos en que la demanda de corriente es muy alta y la corriente de arranque tiene picos muy elevados, como es en el caso de [40, 42]:

- Instalaciones que alimentan receptores con fuertes corrientes de arranque provocadas por altas capacitancias, motores eléctricos de gran potencia, iluminación LEDs, etc.

En la figura 2.23, se visualiza el rango de activación de un interruptor automático tipo D.

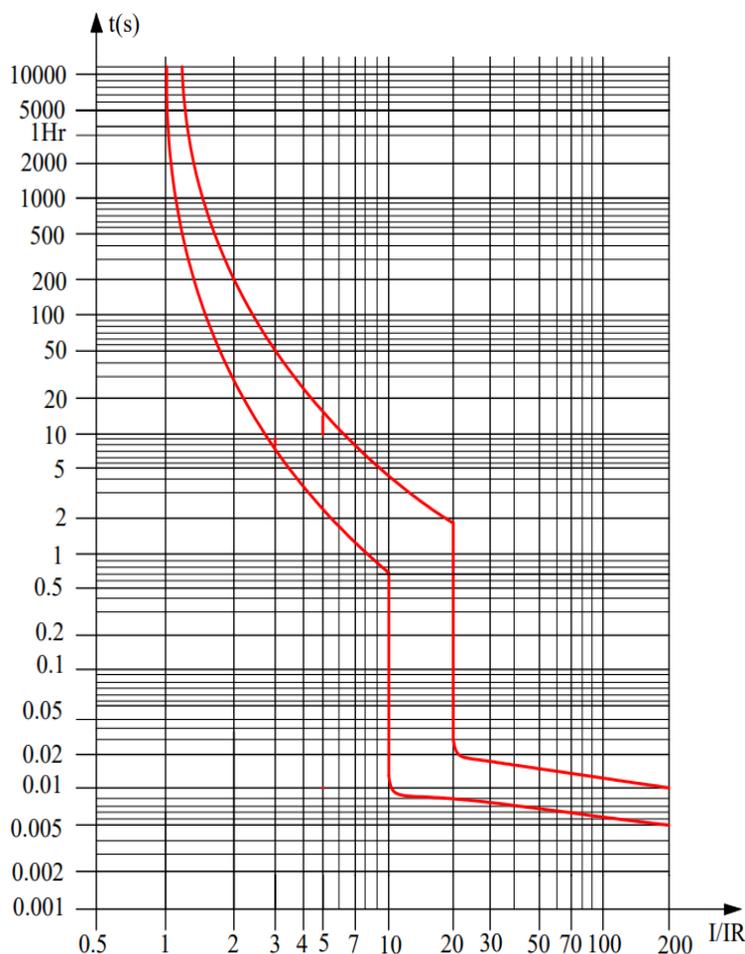


Figura 2.23: Curva D.

Fuente: [42]

La correcta elección de una curva de protección debe contemplar a la corriente nominal y a las posibles corrientes transitorias de arranque y que la curva de disparo del mismo esté siempre por debajo de la curva límite térmica (Z) de las cargas a proteger en el gráfico tiempo – corriente [40].

De manera mas resumida, en la figura 2.24, se visualizan las tres curvas de protección (B, C y D) que van acorde a su rango de disparo según el tiempo y corriente nominal con la cual actúan.

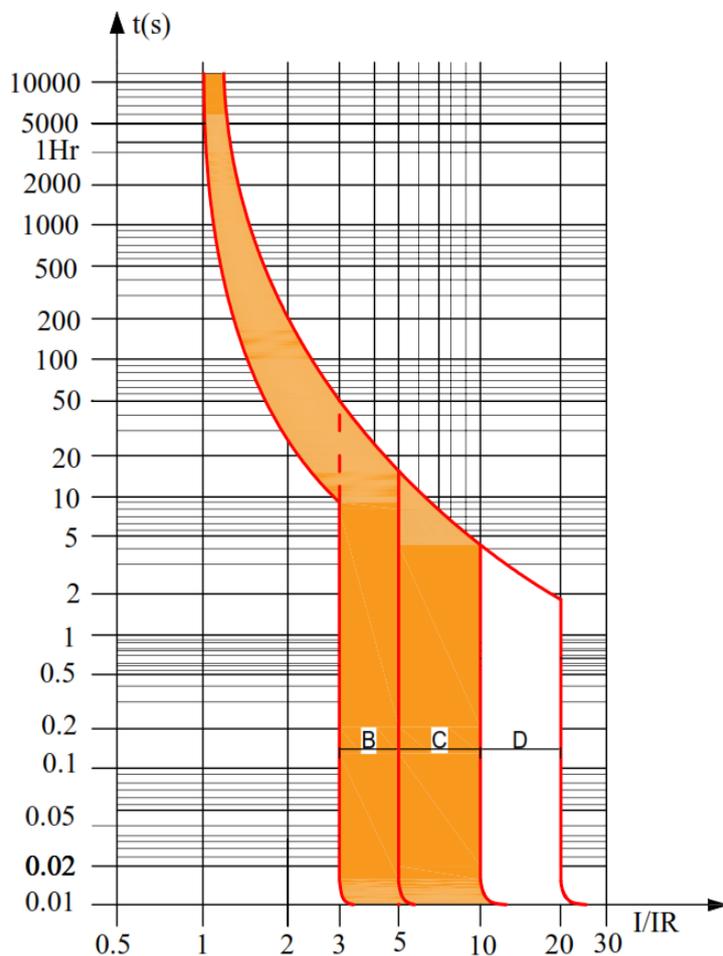


Figura 2.24: Curvas B, C y D de protección.

Fuente: [40, 42]

2.5.5. Criterio de Selección de Interruptores para Iluminación LED

Por la variedad de fabricantes de luminarias LED la corriente de entrada varia significativamente, lo que con lleva a tener ciertas consideraciones al momento de seleccionar un MCB/RCBO.

Al seleccionar un MCB o un RCBO es fundamental que se apliquen las directrices del fabricante del MCB/RCBO y del fabricante de la luminaria LED. No se puede asumir que las directrices de un fabricante puedan aplicarse a los de otros debido a que estos utilizan diferentes métodos de selección para el caso de iluminación LED [39].

2.5.5.1. Por la Potencia Nominal de los Drivers y la Corriente Instantánea de Disparo

El método de selección implica la consideración de la potencia nominal del controlador o driver LED y la curva de disparo instantáneo del dispositivo de protección a utilizar. El tipo de información que proporciona un fabricante sobre sus dispositivos de protección puede indicar cuántos controladores LEDs se pueden conectar a un mismo breaker, esto depende del tipo de protección (B, C o D) que se quiera utilizar [39].

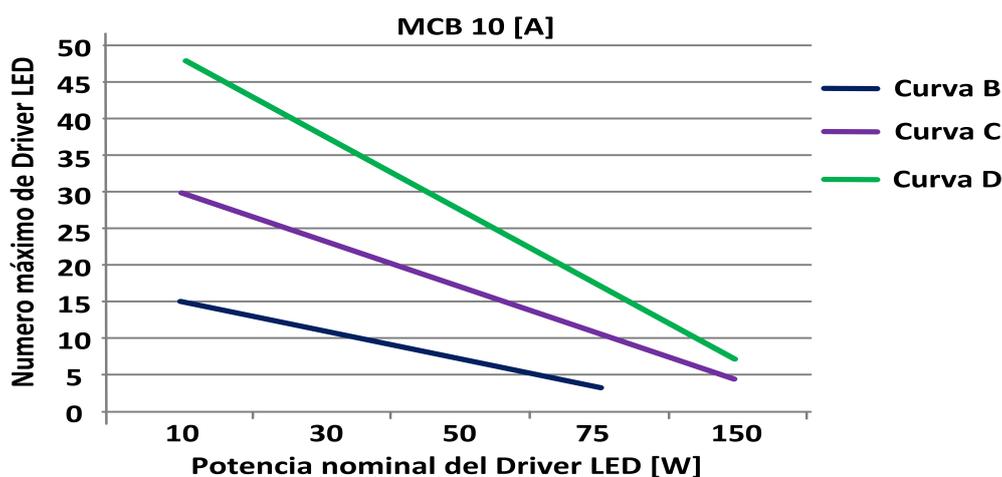


Figura 2.25: Número de controladores vs potencia nominal de un MCB 10.
Fuente Autor

La curva de disparo de ciertos dispositivos de protección se relaciona con la corriente nominal de funcionamiento, ya que, la potencia nominal y el número de controladores LED permiten determinar el tipo de breaker a utilizar.

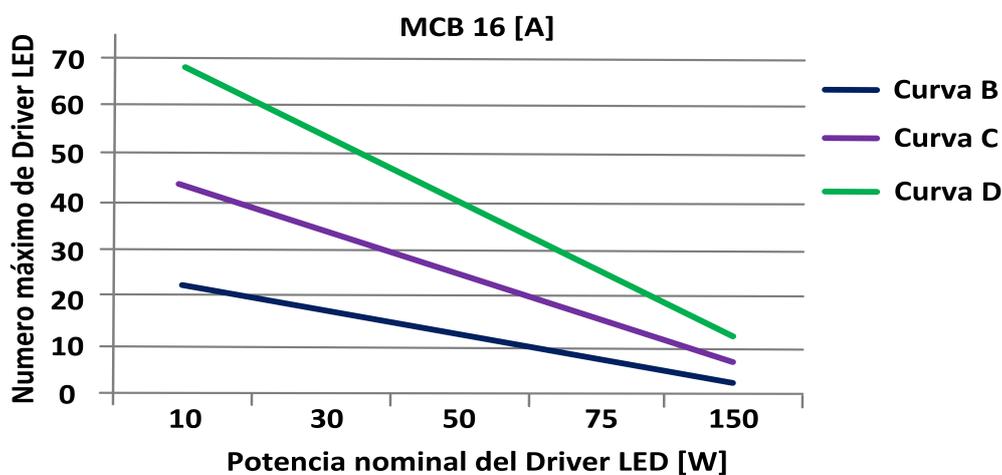


Figura 2.26: Número de controladores vs potencia nominal de un MCB 16.
Fuente Autor

Es importante revisar las especificaciones puestas por el fabricante de los dispositivos de protección, ya que para potencias de controladores LEDs menores a 10 W la corriente de entrada no causaría disparos de las protecciones y no habría ninguna limitación en el número de controladores que se pueda conectar.

2.5.5.2. Por la Duración y Valor Máximo de la Corriente Pico

En este método se considera la corriente de irrupción o corriente pico (I_{peak}) del driver y la capacidad nominal de corriente (I_n) del dispositivo de protección, con el objetivo de correlacionar el producto de estos valores con el tiempo de no disparo del breaker se relaciona el tiempo de la corriente pico (t_{H50}) con el tiempo de no disparo del dispositivo de protección el cual permite seleccionar de manera más adecuada el tipo de protección necesaria, [39].

En el siguiente ejemplo se muestra un gráfico de la curva media de no-violación para el rango de tiempo de 50 μs a 10 ms [39] que viene dada en una escala logarítmica.

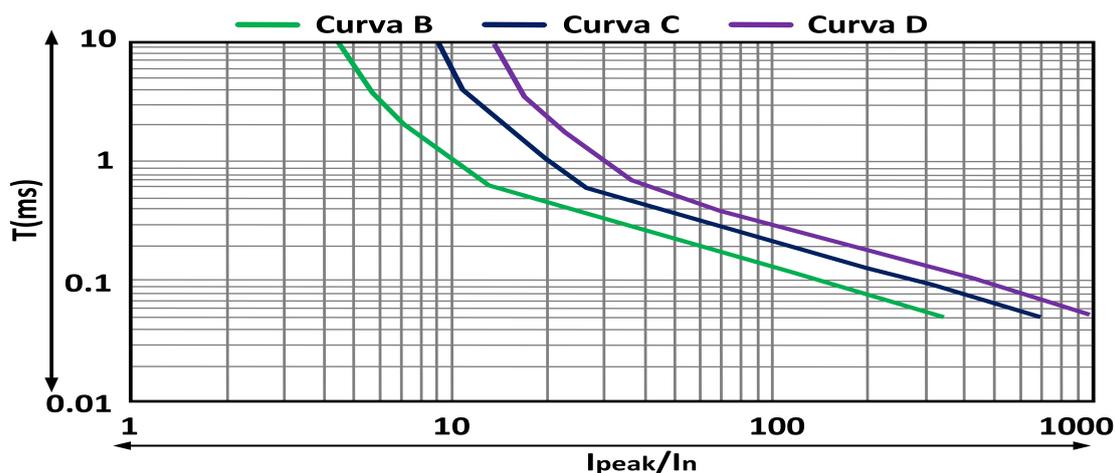


Figura 2.27: Curva media de no disparo para el rango de tiempo de 50 μs a 10 ms.
Fuente Autor

Ejemplo: Para un breaker tipo B se tiene una corriente nominal (I_n) de 10 A y una corriente de irrupción de 100 A (I_{peak}) con una duración de 200 μs (t_{H50}):

Utilizando la figura 2.28 como referencia se puede determinar el tipo de protección que se requiera utilizar, para lo cual, es necesario considerar la corriente de irrupción producida por el driver LED y la corriente nominal del dispositivo de protección [39].

Al obtener la relación de la corriente I_{peak} con la nominal (I_n) este da como resultado una constante en una escala logarítmica. Una vez que se tenga la relación de corriente se puede correlacionar con el tiempo de no disparo [39].

$$\text{Relación de corriente} = I_{peak}/I_n = 100A/10A = 10$$

En la figura 2.28, se observa la correlación entre la corriente y el tiempo de no disparo, en este caso es un ms, el cual es mayor a la duración del tiempo de la corriente de irrupción de $200 \mu s$ (th50). Si el tH50 es mayor a un ms, habría que seleccionar un breaker tipo C o D [39].

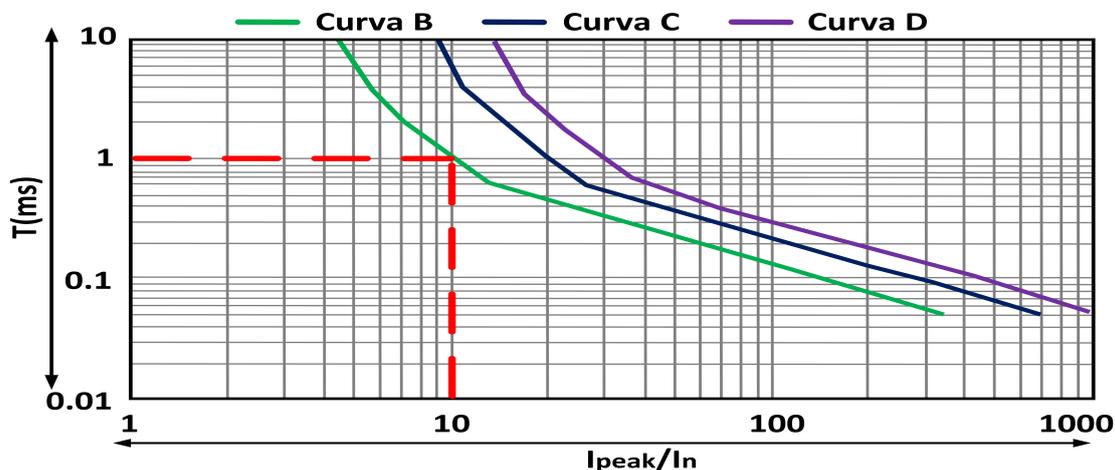


Figura 2.28: Curva media de no disparo para el rango de tiempo de $50 \mu s$ a 10 ms.
Fuente Autor

2.5.5.3. Mediante un Factor Basado en la Duración del Pulso

Este método utiliza un "factor K", este factor se utiliza para calcular la corriente de pico máxima sin disparo del dispositivo de protección 2.29. Para determinar el factor k de una luminaria, se analiza la corriente de irrupción y el tiempo de duración producido por un driver LED, con la curva de tiempo de un breaker B16 se obtiene un factor $k = 5$, tal como se puede observar en la Figura 2.29.

Las corrientes mínimas de las protecciones más usadas son presentadas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Corriente mínima de activación de un MCB/RCBO.

Corriente mínima de disparo instantáneo del MCB/RCBO	
Característica del MCB/RCBO tipo B	$3 \times I_n$
Característica del MCB/RCBO tipo C	$5 \times I_n$
Característica del MCB/RCBO tipo D	$10 \times I_n$

Al analizar la figura 2.29, se observa la correlación del tiempo de duración de la corriente de irrupción (th50) y la curva de disparo del la protección tipo B, la cual ayuda a determinar el factor K necesario para determinar el número máximo de drivers LED.

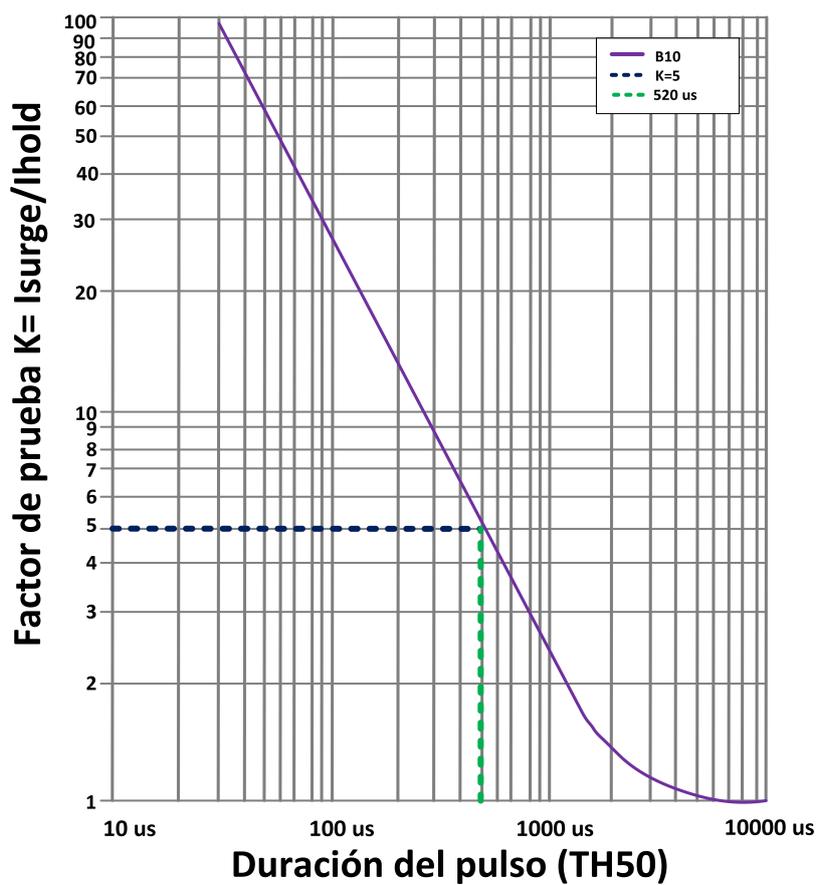


Figura 2.29: Selección del MCB/RCBO por su factor K.
Fuente Autor

Al remplazar los datos en la formula se obtiene la corriente de pico sin disparo (Ihold) [39] del dispositivo de protección.

Ihold = factor K x valor inferior de la corriente instantánea x valor nominal del interruptor MCB.

$$I_{hold} = (5A) \times (MCB B16A) = 240 A$$

$$I_{hold} = (5A) \times (3) \times (16A) = 240 A$$

Por lo tanto, para un driver LED que tiene una corriente de irrupción de 40 A con una duración de 520 μs , el número máximo de drivers LED que el interruptor puede soportar sin que este se dispare por la corriente de irrupción es igual a la corriente pico sin disparo (Ihold) dividido para la corriente de irrupción (Ipeak) [39].

Remplazando los valores, el número máximo de drivers LED que se podrá conectar a un interruptor MCB tipo B16 sera:

$$\text{Número máximo de drivers LED} = I_{hold}/I_{peak}$$

$$\text{Número máximo de drivers LEDs} = 240A/40A = 6 \text{ drivers LED}$$

Cuando el período de arranque es mas largo que cierto valor, por ejemplo 10 ms, el factor de prueba K no es necesario para calcular cuántas unidades de controladores LED se pueden conectar en paralelo, pero se debe usar la curva de disparo [39].

2.5.5.4. Por la Corriente Mínima de Disparo Instantáneo

El fabricante del dispositivo de protección puede proporcionar información sobre la corriente mínima de disparo instantáneo, el cual permitirá seleccionar un tipo de breaker para la iluminación LED [39],

Se analiza una corriente de irrupción provocada por los controladores de unas luminarias LED, esta corriente tiene un pico de arranque de 22 A durante 200 μ s. Se necesita saber cuántos drivers o controladores LEDs se podría conectar a un mismo breaker de 10 A si se quiere encenderlos simultáneamente [39].

Para este caso se necesita revisar el datasheet del breaker o interruptor de protección que proporciona el fabricante, una vez que se haya revisado los datos técnicos de la corriente pico y el tiempo de disparo instantáneo que soporta el breaker se podrá realizar el siguiente cálculo para conocer el número de controlares LED que se puede conectar a un mismo breaker sin que este se llegara a activar.

Para este ejemplo se utiliza un breaker de 10 A en el cual su fabricante afirma que no se dispara con una corriente de pico de 420 A con una duración inferior a 250 μ s [39], al realizar los cálculos se obtiene el siguiente resultados:

$$\text{Número máximo de drivers LED} = 420\text{A} / 22\text{A} = 19 \text{ drivers LED}$$

Por lo tanto, como el tiempo de pulso de 200 μ s es menor que el tiempo de disparo de 250 μ s del MCB/RCBO, 19 controladores de LED pueden conectar a un mismo interruptor de protección [39].

2.6. Sistema de Arranque Suave

Un sistema de arranque suave es un limitador de corriente que está presente en el encendido de un dispositivo, es decir, el equipo que disponga de un sistema de arranque suave reducirá de cinco a ocho veces la corriente de irrupción. Este sistema ayuda a evitar los picos de corriente y a estabilizar de mejor manera el arranque del dispositivo [5].

2.6.1. Circuito Limitador de Corriente

El ICL, es un componente que se utiliza para disminuir las corrientes de irrupción con el fin de evitar daños en los componentes internos de los dispositivos electrónicos, de igual manera puede evitar que se quemen los fusibles o se disparen los disyuntores [43, 44].

Los ICL de alta eficiencia no tienen pérdidas considerables durante el funcionamiento en estado estable y pueden limitar efectivamente la corriente de irrupción, el funcionamiento de estos dispositivos causa operaciones de conmutación, por lo que la sobrecorriente se reduce o limita automáticamente [43, 44].

Se encuentran disponibles dos enfoques básicos para la limitación de la corriente de irrupción: la simple inserción de un dispositivo de protección como limitador de corriente (ICL) en el circuito de alimentación y el uso de un circuito de derivación activo que se activa después de que decae el pico de la corriente de irrupción. Estos también se denominan respectivamente circuitos ICL pasivos y activos. La elección de la técnica de supresión de la corriente de irrupción que se adecue a una aplicación en particular depende de muchas variables [43, 44].

2.6.1.1. Limitación Pasiva

Por lo general, los limitadores de corriente implementados en la práctica o analizados en la actividad de investigación son pasivos, que se definen como dispositivos que están conectados permanentemente al sistema de suministro y no deben desconectarse ni controlarse externamente.

Para fuentes de alimentación muy pequeñas con potencias nominales menores a 10W, la solución más sencilla y práctica para la limitación de la corriente de entrada es simplemente agregar una resistencia óhmica en serie con la carga. Sin embargo, en fuentes de alimentación con potencias más altas, la pérdida de energía que presenta una resistencia fija a la entrada del controlador LED afectaría significativamente la eficiencia general de la luminaria LED, ya que, se estaría presentando una pérdida constante de energía en todo momento. En estos casos, los termistores NTC son la solución ICL estándar establecida para la limitación de corriente pasiva [44].

Los métodos más frecuentes utilizados para limitar las corrientes de irrupción por dispositivos de conmutación de estado sólido son [45]:

- Resistencia y termistor NTC
- Inductor y otros aparatos eléctricos por simplicidad

La ubicación de estos elementos puede modificarse de un caso a otro ya que, se pueden insertar inmediatamente al lado del condensador del filtro o en la entrada del controlador [45], como se puede visualizar en la figura 2.30.

El inductor es un dispositivo pasivo que se puede usar para limitar el cambio de corriente en el circuito. El funcionamiento principal del inductor es limitar el aumento imprevisto de la corriente de irrupción, esta limitación se da ya que, el voltaje inducido por el flujo magnético que se produce dentro del núcleo permite limitar la corriente que pasa a través del inductor [46].

Para limitar la corriente de irrupción, se utiliza también una resistencia o termistor NTC como un dispositivo pasivo, ya que la impedancia de la resistencia es fija [46]. Los termistores NTC se han convertido en la solución ICL estándar [46].

Si el ICL de tipo pasivo está siempre en serie con la carga, las pérdidas de potencia que provoca son elevadas. Según [47], cuanto mayor sea la potencia nominal del dispositivo y cuanto mayor sea su tiempo de funcionamiento típico, más importantes serán las pérdidas de potencia parásitas. Por lo general un NTC y un ICL generan una pérdida de potencia del uno % de la potencia total del dispositivo y la fuente de alimentación tiene un índice de eficiencia del 92 %, aproximadamente el 12.5 % de las pérdidas totales se deben a la NTC.

En la figura 2.30, se observa un esquema de bloques de las diferentes configuraciones para la limitación pasiva de la corriente de entrada.

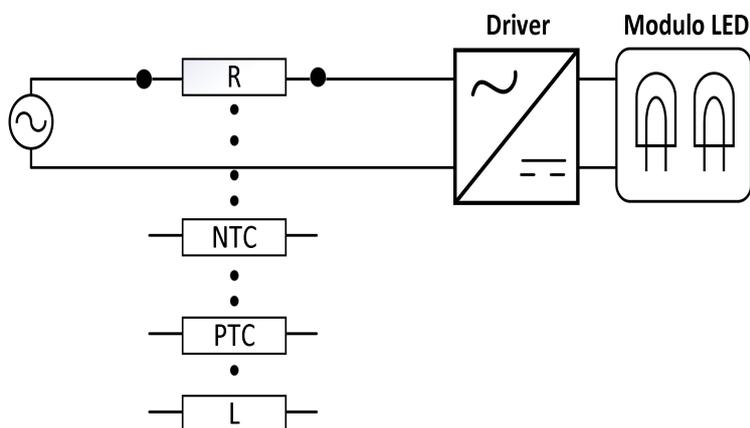


Figura 2.30: Diagrama de bloques para la limitación pasiva de la corriente de entrada.
Fuente: Autor

2.6.1.2. Limitación Activa

El limitador de la corriente de entrada de método activo busca limitar la corriente de irrupción producida por los componentes capacitivos e inductivos de un controlador LED [45, 48]. Este método utiliza una resistencia en serie para luego cambiar a conexión directa, de tal manera que el funcionamiento sea normal en el circuito, tal como se puede visualizar en la figura 2.30.

Se pueden agregar métodos estándar que permiten utilizar componentes más pequeños con respecto a los tradicionales, ofreciendo así las mismas funcionalidades de eficiencia en las fuentes de alimentación [48].

En los niveles de potencia altos, es muy importante que haya una derivación de la corriente de entrada por medio de relés o triacs, una vez que el pico de corriente haya decaído. Dependiendo de los requisitos de la aplicación, este circuito de limitación de

corriente de entrada activa puede emplear una resistencia de potencia, un termistor NTC o un termistor PTC como componente ICL [49].

El relé es un componente electrónico activo que se usa para este tipo de ICL debido a que tiene una mejor eficiencia y rendimiento y se usa principalmente en circuitos que tengan fuentes de alimentación de alta potencia. Este método se puede ajustar al valor máximo de la corriente de entrada y el tiempo de estabilidad a través de la secuencia de control de encendido/apagado a través del circuito de control [46].

Si bien los beneficios de la limitación de corriente de entrada activa son mas evidentes para potencias superiores a 250 W, el mismo enfoque se puede usar para lograr un rendimiento mejorado en aplicaciones con niveles de potencia mas bajos [49].

En condiciones normales de funcionamiento, un ICL de tipo activo funciona con una resistencia óhmica y un dispositivo de control que permite controlar el paso de la corriente, los ICL tienen una resistencia de entre 10 Ω y 500 Ω , según el tipo. Esto es suficiente para limitar el pico de corriente de entrada, una vez que los condensadores del enlace de DC hayan llegado a su funcionamiento nominal, se omite el ICL [49].

Si hay un mal funcionamiento en el circuito de carga, la propiedad específica del termistor sirve para proteger el circuito ya que, la corriente fluye a través del componente provocando que este se calienta y su resistencia aumenta significativamente [50].

Todos estos modos de falla tienen una cosa en común: estrés térmico en el dispositivo limitador de corriente. Hay dos formas de asegurar que el componente ICL no sea destruido por tales eventos: el uso de una resistencia de potencia con una potencia nominal suficiente o el uso de un termistor PTC [50].

En la figura 2.31, se observa un esquema de bloques de las diferentes configuraciones para la limitación activa de la corriente de entrada.

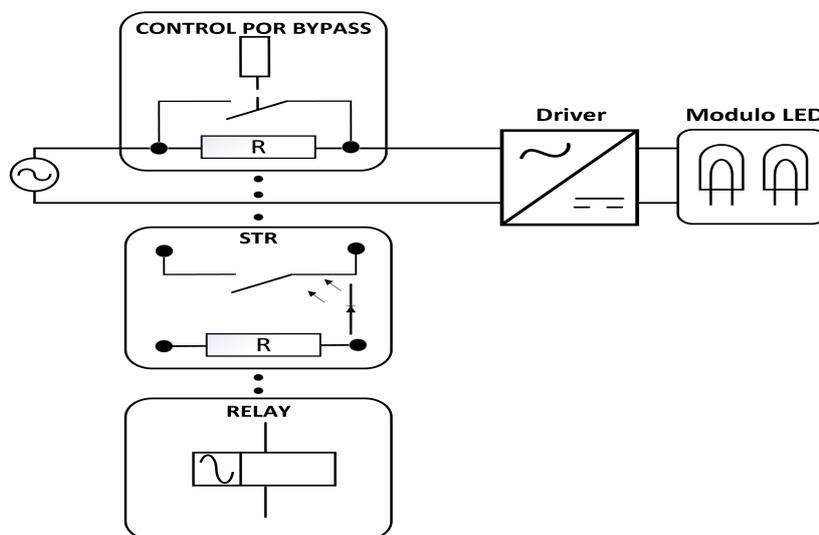


Figura 2.31: Diagrama de bloques para la limitación activa de la corriente de entrada.
Fuente: Autor

Existen dispositivos y métodos que pueden eliminar la corriente de irrupción producidas por las luminarias LED en los circuitos de iluminación, en las siguientes subsecciones se presentan opciones (que permiten tener un arranque suave en el encendido de las luminarias LED) que pueden reducir la corriente de irrupción.

2.6.2. Limitador de Corriente por Control de Derivación

La gran mayoría de los ICL que se utilizan para reducir la corriente de irrupción producidas por las luminarias LED consiste en utilizar una resistencia o termistor de valor conocido en serie al controlador o conjunto de controladores, usualmente son los termistores NTC [50, 51].

Los termistores NTC son de alta resistencia cuando están fríos y de baja resistencia cuando están calientes. En el estado frío, la alta resistencia inicial de la NTC y ICL absorbe eficazmente las corrientes pico de irrupción. Como resultado de la carga de corriente y el subsiguiente autocalentamiento, la resistencia del ICL desciende a un pequeño porcentaje de su valor a temperatura ambiente [50, 51].

2.6.2.1. Limitador Bypass

Debido a que la corriente de irrupción se presenta en el momento del encendido el método de utilizar una resistencia o termistor NTC en serie a los controladores para limitar la corriente de entrada resulta poco eficiente ya que, representa pérdidas de energía en el estado estacionario o funcionamiento permanente [47]. El resistor en el estado de funcionamiento normal, representa varias pérdidas que pueden considerarse inadmisibles si el conjunto de controladores conectados a la salida del ICL es elevado [47].

Para superar este problema, muchos diseñadores incorporan un interruptor en paralelo (generalmente un relé) con la resistencia, sistema más conocido como bypass como se puede visualizar en la figura 2.32. Este método puede ajustar el valor pico de la corriente de entrada y el tiempo de establecimiento mediante el uso de un circuito de control el cual controla el encendido y apagado del interruptor sin pérdidas de energía en el estado de funcionamiento estacionario de la luminaria LED [50, 51].

Al revisar el funcionamiento del ICL por bypass cuando el temporizador alcanza el valor del tiempo prefijado en la conexión este activará el relé interno, provocando que la resistencia quede desconectada. De esta forma, la corriente pasa por el contacto normalmente abierto del relé haciendo que por la resistencia no pase corriente. Así, el sistema es completamente eficiente, a excepción del pequeño consumo residual propio del ICL [50, 51].

Es muy importante que el relé (u otro dispositivo) elimine el cortocircuito del termistor o la resistencia muy rápidamente después de que se desconecte la alimentación. De lo contrario, un corte de energía momentáneo hará que todos los equipos consuman

una sobrecorriente muy grande cuando se reanuda la energía. Idealmente, el circuito de derivación debe desconectarse en unos pocos milisegundos y, ciertamente, mucho antes de que expire el tiempo de “retención” de la fuente de alimentación [50, 51].

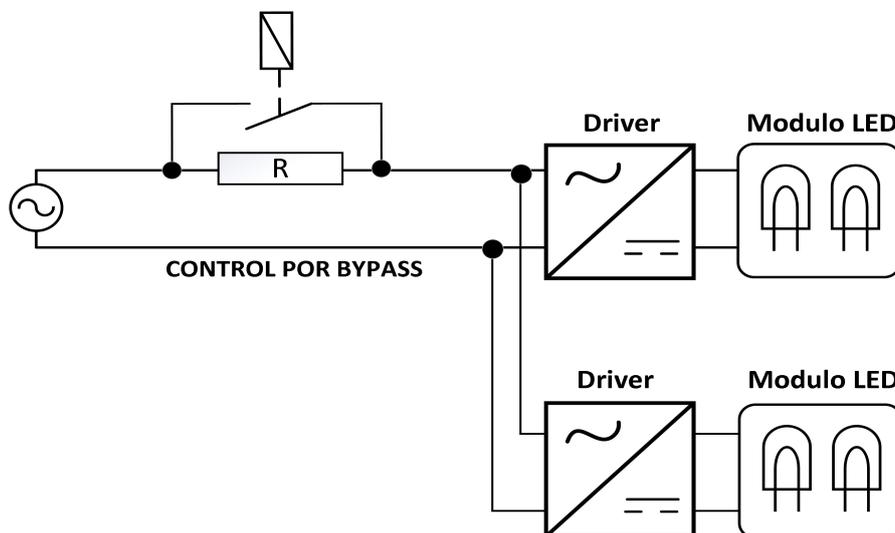


Figura 2.32: Esquema de control por bypass con control de retardo.

Fuente: Autor

2.6.2.2. Limitación por SSR con Función de Cruce por Cero

Los interruptores de estado sólido son dispositivos de conmutación electrónicos que pueden operar en posiciones de encendido o apagado cuando se aplica un pequeño voltaje externo. En los circuitos de AC, los relés de estado sólido (SSR por sus siglas en inglés) con función de paso por cero operan cuando la tensión de la carga (tensión alterna) se acerca o alcanza el punto cero.

Los relés de estado sólido con la función de detección de cruce por cero son adecuados para cargas resistivas, capacitivas y cargas inductivas con un factor de potencia entre 0.7 y 1 [52].

Las ventajas que presenta un SSR con función de paso por cero son:

- Posibilidad de configurar la máxima sobretensión: Al poder controlar el ángulo de fase de la onda sinusoidal de AC de suministro en el momento del arranque se puede reducir la corriente de entrada.
- Eficiencia del sistema: El uso de una resistencia NTC no es apropiado ya que se reduciría la eficiencia del dispositivo en su estado nominal de operación, pero si usamos la configuración de paso por cero se podrá regular eficazmente la potencia suministrada [52].
- Pérdidas bajas por disipación de potencia: Si usamos una resistencia para limitar la corriente, la disipación de potencia en la resistencia sería demasiado alta [52].

2.6.3. Limitador de Corriente por Retardo de Tiempo

Los limitadores de corriente cuentan con varias funciones para reducir las corrientes pico. Un método de limitación es el retardo por tiempo, el cual facilita controlar las fallas producidas en el primer ciclo de onda ya que retarda el encendido de los equipos al no encender las luminarias LED al mismo tiempo.

2.6.3.1. Limitador por Conmutación Temporizada

Algunos fabricantes ofrecen dispositivos auxiliares, como módulos de retardo de tiempo, que pueden venir incorporados en los sistemas de protección o pueden ser utilizados como dispositivos independientes que se pueden incorporar a los circuitos de iluminación. Estos dispositivos proporcionan una conmutación cronometrada de la iluminación LED, lo que propaga las corrientes de irrupción en el tiempo y permiten instalar mas controladores en un solo breaker o (MCB/RCBO).

Los dispositivos de retardo de tiempo también se pueden utilizar junto con contadores lógicos programables (por sus siglas en inglés PLC) para gestionar grandes corrientes de entrada coordinando la conmutación de múltiples circuitos en una secuencia predeterminada [53].

La conmutación temporizada dentro de la iluminación LED se basa principalmente en el encendido secuencial de varias lámparas en paralelo, es decir, la corriente de conmutación temporizada logra una mayor relación de atenuación que los controladores de retroiluminación de LED [54, 55].

La corriente de irrupción se puede reducir mediante un arranque tipo escalonado a través de módulos de retardo de tiempo. Para lograr el arranque suave tipo escalonado se utiliza la configuración que es basada en la técnica de salto de reloj para la limitación de la corriente de entrada en luminarias LED [53].

En la figura 2.33, se visualiza el diagrama de bloques que cuenta con dos módulos LED en paralelo, uno de estos módulos cuenta con un control por relay que retarda el tiempo en el momento del encendido de la luminaria con respecto al primer módulo.

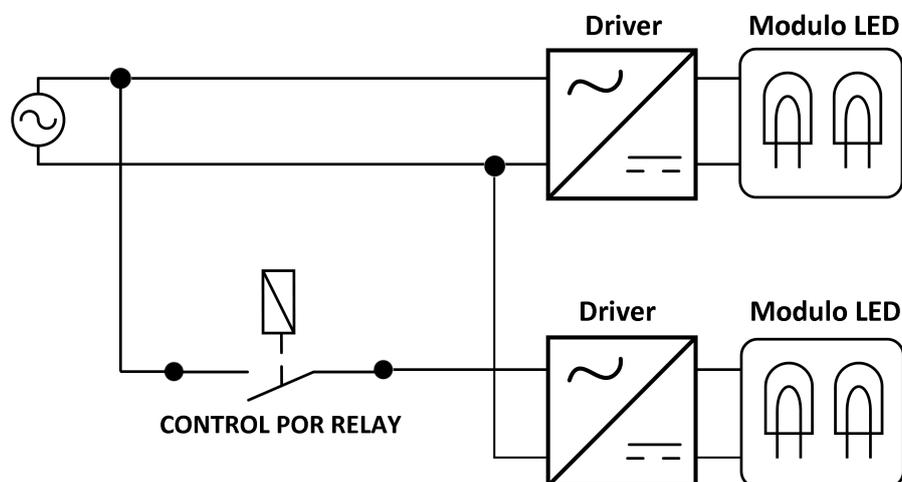


Figura 2.33: Esquema de control por relay con control de retardo.
Fuente: Autor

2.6.3.2. Retardo de Tiempo Integral Programable o Aleatorio

Algunos fabricantes de iluminación LED incluyen un retardo de tiempo aleatorio o programable integral entre el encendido y el pico de corriente de entrada. Para un grupo de luminarias en el mismo circuito, esto distribuye las corrientes de irrupción en el tiempo, lo que permite instalar mas controladores en un solo MCB/RCBO [56].

2.6.4. Sistema limitador de Corriente por Variación de Tensión

Existen métodos para la regulación de tensión en las luminarias LED que permiten regular la tensión AC de una luminaria LED de manera eficiente, segura, y a su vez reducir la corriente de irrupción.

La regulación de voltaje también es llamado variación de tensión ya que permite controlar la amplitud de voltaje con el cual se desea trabajar. Al realizar la variación de voltaje, existe una variación de corriente en la carga la cual esta presente en un pequeño lapso de tiempo dentro del periodo de la onda sinusoidal [57, 58]. Esta regulación se puede dar mediante el control de la amplitud de la señal de alimentación, ya sea de forma externa o interna.

En las siguientes subsecciones se presentan los métodos más usados para la reducción de la corriente de irrupción mediante el control de voltaje [57, 58].

2.6.4.1. Regulación de Tensión en el Encendido

Las sobrecorrientes presentes en el momento del encendido de luminarias LED van acorde al nivel de voltaje y del ángulo de fase que presenta la fuente de alimentación, por ello el control de voltaje al momento del encendido reducirá la corriente de irrupción de manera significativa [59].

Un variador de tensión debe poseer una dinámica que sea efectiva en el control del voltaje ante los cambios de la carga. Dentro de estos variadores hay un sistema de control el cual permite regular la tensión de entrada de manera eficiente ante las exigencias de energía de la carga, por efecto del control del voltaje a un 10 % del valor nominal se podrá reducir la corriente de arranque en el encendido de las luminarias LED [59].

En la figura 2.34, se muestra una fuente regulable de tensión que alimenta a dos luminarias LED en paralelo, cuyo objetivo es el momento del encendido es entregar tensión mínima necesaria para encender las luminarias y posterior vaya incrementándose hasta llegar al valor nominal de operación . Esta regulación de tensión reduce la corriente pico en el momento del encendido de la luminaria.

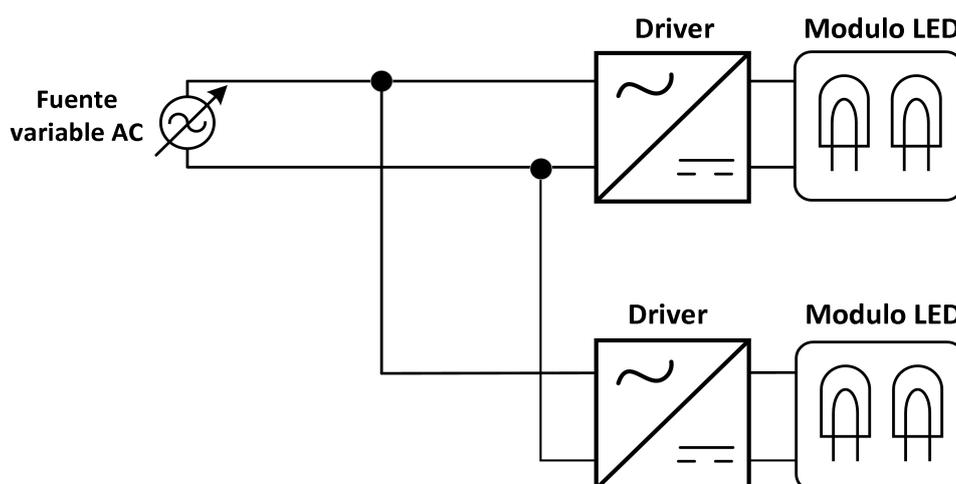


Figura 2.34: Esquema de control por variación de tensión.
Fuente: Autor

Las ventajas que presenta un variadores de tensión son [60, 61]:

- El ajuste de tensión de manera precisa (según la tensión seleccionada).
- Poseen un control del 100 % de la regulación de tensión.
- Ofrecen fiabilidad del ajuste de tensión.

Los variadores de tensión al momento de trabajar tienen ventajas que van en función de su eficiencia y duración, estas ventajas son [60, 61]:

- La regulación de la tensión muy precisa, se da por un elevado numero de espiras por voltio (según el fabricante).

- No distorsionan la forma de onda senoidal (Depende del tipo de variador de tensión y del fabricante) [61].

Aplicaciones del variador de tensión: El objetivo de un variador de tensión es el de poder variar la tensión desde cero hasta la tensión máxima con el cual trabaja la carga. Algunas de las aplicaciones de los variadores más habituales son [62, 63]:

- Dentro de zonas de luminotecnia (iluminación arquitectónica, parques, iglesias, etc.).
- Regulación de temperatura a través de cargas resistivas.
- Regular la velocidad de motores eléctricos.
- Estabilizadores de tensión.

2.6.4.2. Atenuación del Flujo Luminoso

Las sobrecorrientes de entrada producidas por luminarias LED se pueden reducir utilizando dispositivos semiconductores activos para el control de la corriente de entrada. Por lo general, algunos componentes pasivos es la opción ideal para la mayoría de los casos [64].

El control del convertidor para la atenuación del flujo luminoso se enfoca principalmente en evitar fallas, es decir, que ninguna luminaria LED soporte una disminución significativa del flujo lumínico durante su operación. Este controlador implementa simultáneamente las funciones de control de corriente, tiempo compartido y atenuación lo cual se regula para obtener el flujo luminoso deseado, de modo que la corriente media que fluye a través de cada luminaria LED se controle en consecuencia [65].

Una característica principal del flujo lumínico de una luminaria LED depende directamente de la corriente promedio que fluye a través de él [65], con la atenuación o dimerización del flujo luminoso de las luminarias LED se evitan los cambios bruscos de iluminación inherente al encendido directo, este método se lo puede aplicar en luminarias que tengan la función de control de encendido programable interno.

Las luminarias LED compactas, son susceptibles a encenderse por pequeñas tensiones residuales que generan parpadeos y comprometen su vida útil, por lo cual se debe tener especial atención en las especificaciones del dispositivo ya que no todas las luminarias LEDs cuentan con esta función de dimerización o control del flujo luminoso [64].

Capítulo 3

Análisis de las Características Técnicas de las Luminarias y Fuentes LED

La Fundación Iluminar dispone de luminarias LED de alta potencia para uso arquitectónico las cuales son utilizadas para la iluminación de espacios públicos como: plazas, parques, iglesias, edificaciones, etc. Este tipo de luminarias cuentan con fuentes de alimentación internas y externas de alta potencia.

El análisis a desarrollarse tiene como objetivo la clasificación a través de hojas técnicas y catálogos que presentan los fabricantes de los equipos de iluminación que dispone la Fundación Iluminar. Para la clasificación de las luminarias LED y fuentes de alimentación se tiene en cuenta las características técnicas y eléctricas como: la marca, el ambiente de uso, voltaje, potencia, tipo de control y corriente pico.

3.1. Luminarias LED de Uso Arquitectónico de Alta Potencia

Las luminarias LED en la actualidad son las principales fuentes de iluminación, por lo cual, al realizar una clasificación correcta ayuda a determinar posibles soluciones ante corrientes picos al momento de su encendido.

3.1.1. Clasificación de Luminarias Lineales LED

Para la clasificación es importante conocer el tipo de control que tienen este tipo de luminarias, con el objetivo de evaluar las posibles soluciones al momento de realizar un control que permita tener un arranque suave en las luminarias.

La clasificación de las luminarias se la realiza en función de la categoría que define el fabricante. En la tabla 3.1 los valores descritos detallan que la potencia máxima no sobrepasa los 72 W entre luminarias y existen dos tipos de control como: encendido directo y programable.

Las características eléctricas a considerar para la clasificación de las luminarias van acorde a la alimentación, rango de potencia, frecuencia y tipo de control. Todas estas características descritas facilitan entender el funcionamiento de las luminarias y para hallar una posible solución para la reducción de corriente pico a través del tipo de control que estas dispongan.

Tabla 3.1: Clasificación de luminarias lineales LED que dispone la Fundación Iluminar.
Fuente: [66, 67]

MARCA	MODELO	AMBIENTE	TENSIÓN	POTENCIA	CONTROL
PHILIPS	Vaya Linear MP, White & Mono	Exterior - Iluminación Arquitectónica	100 – 277 VAC, 50 / 60Hz	18 W 60 W	On/Off, no regulable
PHILIPS	Vaya Linear LP types: -LP BCP421 (RGB) -BCP422 (white light) -BCP423	Exterior - Iluminación Arquitectónica	100 - 240 VAC, 50/60 Hz	14 a 28 W 10 a 20 W	DMX para versiones RGB
PHILIPS	eW Graze MX Powercore 2700K	Exterior - Iluminación Arquitectónica	100 - 277 VAC, 50/60 Hz	15W-(1ft) 30W-(2ft) 45W-(3ft) 60W-(4ft)	Atenuación, compatible con atenuadores de tipo ELV de fase inversa
GRIVEN	PARADE S-20 S-40 S-60	Exterior - Iluminación Dinámica y Arquitectónica	100 - 240 VAC, 50/60 Hz	28W-(S-20) 49W-(S-40) 72W-(S-60)	On/Off, regulable
AMERICAN	Manguera LED USA kits/ RL-LED Flexbrite	Exterior	120 VAC, 60 Hz	0.77 W por pie	Oscurecimiento del 5-100% con atenuador ELV/LED

3.1.2. Análisis de las Luminarias Lineales por el Tipo de Fuente y Corriente de Irrupción

Al analizar otro tipo de enfoque en la clasificación de las luminarias lineales LED, se pudo considerar otros factores como el tipo de fuente que este lleve para su funcionamiento y su corriente de irrupción.

Las características analizadas en la tabla 3.2 determinan que la mayoría de luminarias LED presentan una fuente interna a excepción de la luminaria lineal tipo tira LED AMERICAN, la cual consta de una fuente externa de alimentación.

Es importante considerar la corriente de irrupción que puedan tener este tipo de luminarias en su encendido directo, la tabla 3.2 presenta que el fabricante no indica la corriente pico de sus luminarias, esto se debe a que la corriente de irrupción sólo es necesario para los drivers LED con una potencia máxima de 100 W o más.

La corriente de irrupción en los controladores LED con una potencia inferior a 100W es insignificante y muchos fabricantes optan por no ponerla, pero es importante su consideración ya que los controladores de otros fabricantes pueden tener corrientes de irrupción más altas en los controladores menores a 100 W.

Tabla 3.2: Clasificación de las luminarias lineales LED por su tipo de fuente y corriente de irrupción.

Fuente: [66, 67]

MARCA	MODELO	TENSIÓN	POTENCIA	FUENTE	IPEAK
PHILIPS	Vaya Linear MP, White & Mono	100 – 277 VAC, 50 / 60Hz	18 W 60 W	Interna	No indica
PHILIPS	Vaya Linear LP types: -LP BCP421 (RGB) -BCP422 (white light) -BCP423	100 - 240 VAC, 50/60 Hz	14 a 28 W 10 a 20 W	Interna	No indica
PHILIPS	eW Graze MX Powercore 2700K	100 - 277 VAC, 50/60 Hz	15W-(1ft) 30W-(2ft) 45W-(3ft) 60W-(4ft)	Interna	No indica
GRIVEN	PARADE S-20 S-40 S-60	100 - 240 VAC, 50/60 Hz	28W-(S-20) 49W-(S-40) 72W-(S-60)	Interna	No indica
AMERICAN	Manguera LED USA kits/ RL-LED Flexbrite	120 VAC, 60 Hz	0.77 W por pie	Externa	No indica

3.1.3. Clasificación de Luminarias LED Tipo Flood

Al revisar los detalles de las hojas técnicas se desarrolla una clasificación en base a la categoría definida por el fabricante. La tabla 3.3 describe las características de las luminarias tipo flood o de inundación. Esta clase de luminarias se caracteriza por tener una mayor potencia y cobertura en su rango de iluminación.

Un factor fundamental mostrado en la tabla 3.3 es el tipo de control que tiene cada luminaria, ya que mediante el control que estas dispongan se podría considerar algún tipo de propuesta programable en su encendido. Al analizar este tipo de luminarias en la tabla 3.3 se puede observar que todas presentan un tipo de control el cual permitiría realizar un arranque suave en las luminarias a través de programación.

La tabla 3.3 describe las características eléctricas de cada luminaria como: alimentación, rango de potencia, frecuencia y tipo de control. Todas estas características descritas facilitan entender el funcionamiento de las luminarias para encontrar posibles soluciones ante la corriente de irrupción.

Tabla 3.3: Clasificación de luminarias LED de alta potencia que dispone la Fundación Iluminar.

Fuente: [66, 67]

MARCA	MODELO	AMBIENTE	TENSIÓN	POTENCIA	CONTROL
PHILIPS	Tango G2 LED tipo BVP281	Exterior - Iluminación Deportiva	220-240 VAC 50/60Hz	40W 80W 120W	Controles opcionales - DALI
PHILIPS	eW Burst Powercore 8 ° nativo (sin lente de extensión)	Exterior - Iluminación Arquitectónica	100 - 277 VAC, 50/60 Hz	30 W	Atenuación, compatible con atenuadores de tipo ELV de fase inversa
PHILIPS	eW Burst Compact Powercore (lente de 23 ° de extensión)	Exterior - Iluminación Arquitectónica	100 - 277 VAC, 50/60 Hz	15 W	Atenuación, compatible con atenuadores de tipo ELV de fase inversa
GRIVEN	Poweshine MK2 D	Exterior - Iluminación Arquitectónica Dinámica y Artística	100-277 VAC, 50 / 60Hz	576W	DMX para RGBW LEDs
GRIVEN	Powershine MK2 S	Exterior - Iluminación Arquitectónica Dinámica y Artística	90-250 VAC, 50/60Hz	290W	DMX
GRIVEN	JADE 9	Exterior - Iluminación Arquitectónica y Artística	100-240 VAC, 50/60Hz	23W	DMX

3.1.4. Análisis de las Luminarias Tipo Flood por el Tipo de Fuente y Corriente de Irrupción

El análisis de este tipo de luminarias va acorde al tipo de fuente y la corriente de irrupción que tienen este tipo de luminarias .

Al analizar la tabla 3.4 se muestran dos luminarias tipo flood que no cuentan con una fuente de alimentación interna debido a su alta potencia. Es importante considerar que para este tipo de luminarias la fuente de alimentación podría generar corrientes de irrupción que pueden causar algún tipo de irregularidades en el funcionamiento de las protecciones.

La corriente de irrupción en los controladores LED con una potencia mayor a 100 W podría provocar picos de corriente en el momento de su encendido.

La tabla 3.4, muestra la clasificación de las luminarias LED de alta potencia tipo flood en la cual el fabricante no presenta especificación sobre la corriente pico de las luminarias que no cuentan con una fuente de alimentación.

Tabla 3.4: Clasificación de las luminarias tipo flood LED por su tipo de fuente y corriente de irrupción.

Fuente: [66, 67]

MARCA	MODELO	TENSIÓN	POTENCIA	FUENTE	IPEAK
PHILIPS	Tango G2 LED tipo BVP281	220-240 VAC 50/60Hz	40W 80W 120W	Interna	No indica
PHILIPS	eW Burst Powercore 8 ° nativo (sin lente de extensión)	100 - 277 VCA, 50/60 Hz	30 W	Interna	No indica
PHILIPS	eW Burst Compact Powercore (lente de 23 ° de extensión)	100 - 277 VCA, 50/60 Hz	15 W	Interna	No indica
GRIVEN	JADE 9	100V– 240 VAC, 50 / 60Hz	23W	Interna	No indica
GRIVEN	POWERSHINE MK2 D	100 – 277 VAC, 50 / 60Hz	576W	Externa	Según la fuente
GRIVEN	POWERSHINE MK2 S	90 – 250 VAC, 50 / 60Hz	290W	Externa	Según la fuente

3.2. Luminarias LED de Uso Arquitectónico de la Catedral Inmaculada Concepción

La catedral Inmaculada Concepción cuenta con iluminación arquitectónica de alta potencia en sus cúpulas. Esta iluminación se encuentra distribuida a través de luminarias tipo flood y luminarias lineales que sirven para realzar toda su infraestructura, como se visualiza en la figura 3.1.



Figura 3.1: Uso de iluminación arquitectónica en la catedral Inmaculada Concepción.
Fuente: Autor

3.2.1. Luminarias Lineales LED

Las luminarias lineales LED son comúnmente conocidas como tubos o tiras LED, estas luminarias se extienden sobre la parte arquitectónica, logrando así funciones decorativas. Sus principales beneficios son [68]:

- Instalación rápida y fácil.
- Se utiliza tanto para interior como exterior.
- Adecuado para aplicaciones de bajo perfil.

En la siguiente figura 3.2, podemos visualizar una luminaria lineal LED que pertenece a la tabla 3.1.



Figura 3.2: Vaya Linear PARADE S-60 de 72W.
Fuente: [67]

3.2.2. Luminarias LED Tipo Flood

Las luminarias flood que en español significa inundación, emplean luminarias LED de alta potencia para dar realce lumínico en las fachadas arquitectónicas, cuya finalidad es crear una diversidad de efectos lumínicos y rayos de colores en toda la área a iluminar. Estas luminarias tienen tres características principales que son consideradas para el diseño exterior, debido a que [69]:

- Tienen retardo restringido, es de difícil atenuación ya sea por altas vibración térmica o golpes, y la salida de luz depende del ángulo del haz de luz [69].
- Resistentes a altas y bajas temperaturas, y se pueden encontrar en el mercado ya que están disponibles en diferentes tamaños y potencias [69].
- Su grado de protección es IP66, indica que el ensamblaje de la luminaria está bien hermetizada debido a que no permite el ingreso de polvo y agua a la luminaria [69].

Estas luminarias ofrecen una excelente salida de luz, ahorro de energía y reduce zonas oscuras de manera más fácil que las luminarias convencionales. Este tipo de luminarias cuentan con un sistema de iluminación con LEDs nuevos y avanzados, tienen los más altos niveles de innovación, sostenibilidad y calidad de luz [69].

En la figura 3.3, se aprecia una lámpara LED tipo flood de alta potencia que dispone la Fundación Iluminar que es utilizada para iluminar las cúpulas de la Catedral de la Inmaculada Concepción de Cuenca.



Figura 3.3: Luminaria POWERSHINE MK2 D.
Fuente: [70]

3.3. Fuente de Alimentación Conmutada para Luminarias LED de Alta Potencia

Las fuentes conmutadas que dispone la Fundación Iluminar para sus luminarias LED son de tipo conmutadas de alta potencia, este tipo de fuentes se caracteriza por su eficiencia en el control de corriente y voltaje lo que las hace idóneas para la implementación en luminarias LED de alta potencia ya que estas son sensibles a cambios de corriente y voltaje.

El análisis que se presenta tiene como objetivo dar a conocer la importancia de la corriente de irrupción de las fuentes conmutadas de alta potencia, para lo cual se considera la corriente de irrupción descrita por el fabricante.

3.3.1. Fuente de Alimentación Serie HLG-320H

La serie HLG-320H es un controlador LED de VAC / VDC de 320 W que presenta un voltaje constante de modo dual que varía entre 12 VDC y 54 VDC, ya que por su la alta eficiencia de hasta 94 %, toda la serie puede funcionar con una temperatura de caja de -40°C a 90°C . El diseño de la carcasa metálica y el nivel de protección de entrada IP67/65 permiten que esta serie se adapte a aplicaciones tanto en interiores como en exteriores. El HLG-320H está equipado con varias opciones de funciones, como metodologías de atenuación para proporcionar la flexibilidad de diseño óptima para el sistema de iluminación LED.

En la figura 3.4, se visualiza la fuente conmutada de la serie HLG-320H de la marca Mean Well implementada como fuente de alimentación de la luminaria POWERSHINE MK2 D de la figura 3.3.



Figura 3.4: Fuente conmutada Mean Well.
Fuente: Autor

3.3.2. Codificación del Modelo HLG-320H

El proceso de clasificación parte de la identificación que es presentada por el fabricante para identificar el modelo de la fuente en función del nombre de la serie, potencia nominal, voltaje de salida y opciones de funcionamiento.

En la figura 3.5 se observa la codificación propuesta por el fabricante para identificar el modelo de la fuente conmutada según sus características principales.

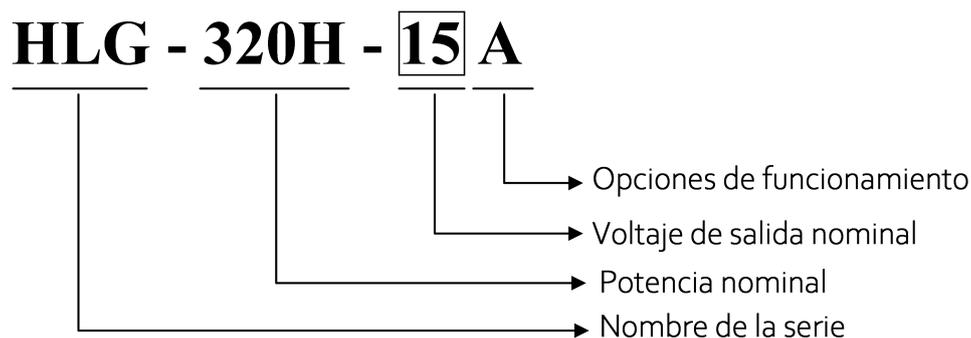


Figura 3.5: Codificación.
Fuente: Autor

Las especificaciones descritas en la tabla 3.5, corresponde a la codificación de la fuente, según el tipo de funcionamiento, grado de protección y su función principal.

Tabla 3.5: Codificación del modelo según el fabricante MEAN WELL.
Fuente: Autor

Tipo	Nivel IP	Función
Vacio	IP67	Io y Vo fijos
A	IP65	Io y Vo ajustable a mediante de un potenciómetro integrado
B	IP67	Función de atenuación 3 en 1 (1-10VDC, señal PWM de 10V y resistencia)
AB	IP65	Io ajustable mediante un potenciómetro interno y atenuación 3 en 1 (1-10VDC, señal PWM de 10V y resistencia)
C	N/A	Bloque de terminales para conector de E/S. El voltaje de salida y el nivel de corriente constante se pueden ajustar a través del potenciómetro interno.
D	IP67	Función de atenuación por temporizador.

3.3.3. Análisis de la Clasificación de las Fuentes de Alimentación Conmutada

La tabla 3.6 muestra dos tipos de fuentes conmutadas que presentan una corriente de irrupción de 70 A con una duración de 1010 μ s. El análisis determina que la corriente de irrupción puede provocar falsas activaciones en las protecciones si se excede el número de luminarias y fuentes conectadas a un mismo breaker, de igual manera se observar que el fabricante recomienda utilizar como máximo dos fuentes conectadas a un mismo breaker tipo C.

En la tabla 3.6, se determina la clasificación de las fuentes que dispone la fundación Iluminar para luminarias LED de alta potencia.

Tabla 3.6: Clasificación de las fuentes de alimentación para iluminación LED.

		Fuente: Autor	
MODELO		HGL-320H -12 A	HGL-320H - 48
S A L I D A E N T R A D A	Voltaje DC	12V	48 V
	Región de corriente constante	6-12V	24-48 V
	Corriente nominal	22 A	6.7 A
	Potencia nominal	264 W	321.6 W
	Rango de voltaje dimerizable	Ajustable para tipo A/C - con potenciómetro incorporado	
		10.8 -13.5 V	43-52 V
	Rango de corriente dimerizable	Ajustable para tipo A/AB/C - con potenciómetro incorporado	
		11-12 A	3.35 -6.7 A
	Rango de voltaje	90 - 305 VAC 127-431 VDC	
	Rango de frecuencia	47-63 Hz	
Corriente AC	3.5A 115VAC 1.65A 220VAC		
Corriente Inrush	Arranque en frío 70A (duración 1010 us medido al 50% pico) a 230 VAC		
Máximo de circuitos por braker	1 unidad por circuito en un breaker tipo B y 2 unidades por circuito en un breaker tipo C a 230VAC		

Capítulo 4

Adquisición y Análisis de Datos

Las luminarias LED son cargas no líneas, puesto que, su impedancia varia por fluctuaciones que pueda presentar la señal de entrada de la red eléctrica, lo que provoca un desbalance en los niveles de tensión y corriente [71].

Un efecto de las luminaria LED de alta potencia sobre la calidad de la energía es la corriente de irrupción durante el encendido, puesto que, los equipos de iluminación LED de alta potencia de mala calidad incrementan la contaminación armónica en el red [71].

4.1. Obtención de Datos Durante el Encendido de las Luminarias LED

Para la adquisición de datos durante el encendido de las luminarias LED de las cúpulas de la catedral de la Inmaculada Concepción, se contó con el equipo registrador 1735 Power Logger - Fluke, visto anteriormente.

Para la configuración del registrador se tuvo en cuenta un factor de muestreo el cual es importante para la toma de mediciones ya que, el tiempo de grabación y van acorde a intervalos de tiempo para realizar en los registros de grabación.

El factor de tiempo graba en función de la configuración que se haya seleccionado, es decir, si se quiere grabar datos cada 10 segundos, el equipo grabará solo por 12 horas.

Los periodos de tiempo disponibles en el registrador están establecidos en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Períodos de medición máximos posibles.

Fuente: Autor

Intervalo Promedio	Tiempo de Registro
0.5 segundo	36 minutos
1 segundo	1 hora con 12 minutos
2 segundos	2 horas con 24 minutos
5 segundos	6 horas
10 segundos	12 horas
30 segundos	1 día con 12 horas
1 minuto	3 días
5 minutos	15 días
10 minutos	30 días
15 minutos	45 días
20 minutos	60 días

Al configurar el registrador con el intervalo de un segundo, el tiempo máximo en registrar los datos es de una hora con 12 minutos. Para montar el registrador en el cuadro de carga de las cúpulas de la catedral, se revisa la distribución de los circuitos y cuantas líneas de alimentación llegan al cuadro.

En la figura 4.1, se observa la inspección y revisión del gabinete del cuadro de cargas.



Figura 4.1: Revisión de la distribución de los circuitos de iluminación.

Fuente: Autor



Figura 4.2: Montaje del registrador en el gabinete del cuadro de cargas.

Fuente: Autor

Una vez conocida la instalación de cuadro de cargas se configura el equipo registrador y se monta en el cuadro de cargas como se visualiza en la figura 4.2. Para realizar el montaje se utiliza la configuración seleccionada, como es el diagrama de conexión de estrella trifásica

como se visualiza en la figura 2.20. Se selecciona la conexión estrella trifásica debido a que la alimentación es una red trifásica, como se observa en la siguiente figura 4.3.

El equipo se deja instalado en el cuadro de cargas por el tiempo de un día, toda la base de datos de la información registrada por equipo se importa a través del Software Power Logger Classic (Fluke) que se encuentra disponible en la página del fabricante. Cabe mencionar que la datos que se exporta se presenta en un formato .CSV, el cual se importa a Matlab y Excel para analizar y realizar las gráficas.

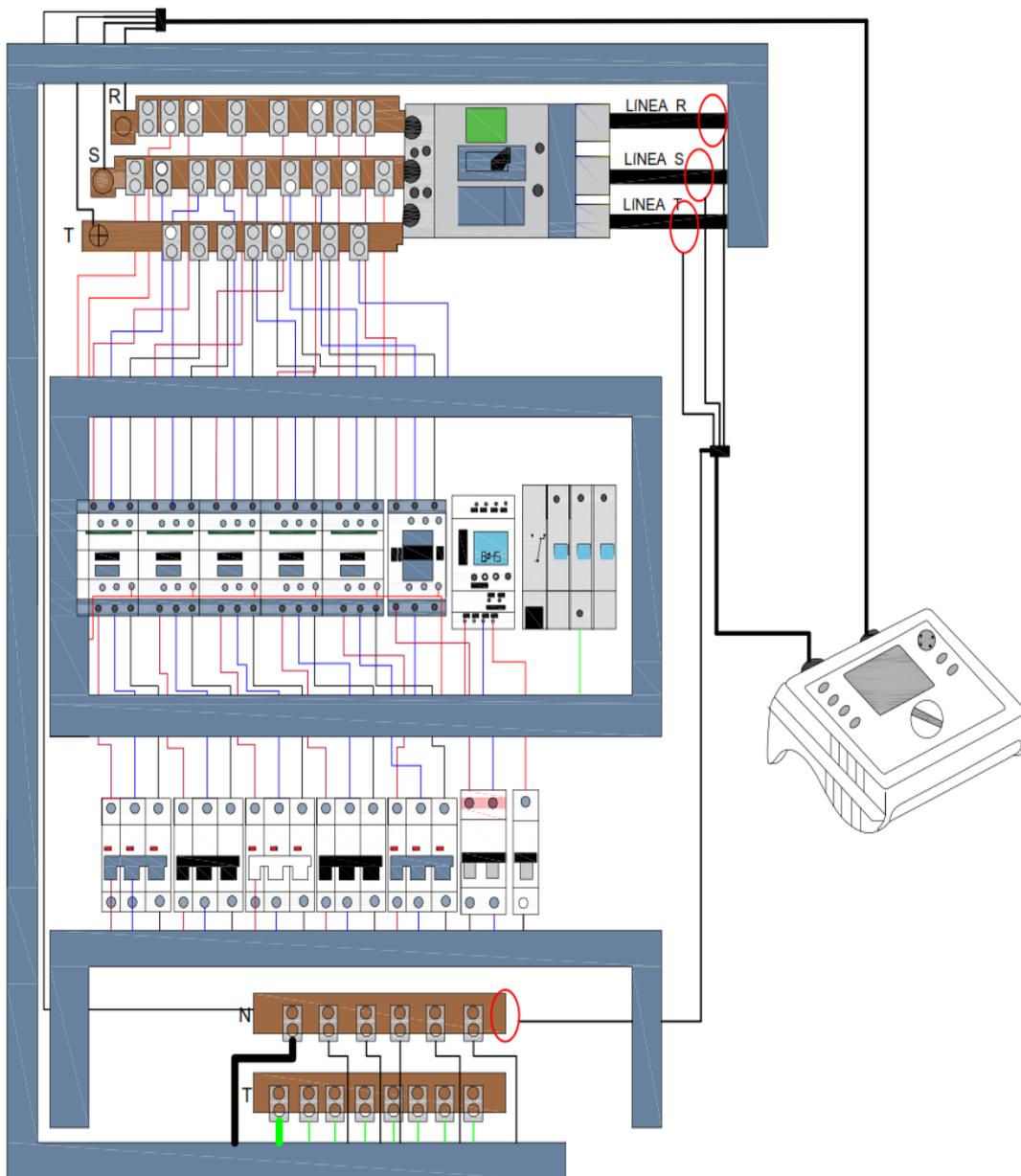


Figura 4.3: Conexión del equipo de medición de datos conectado al gabinete eléctrico de la Catedral de la Inmaculada Concepción.

Fuente: Autor

4.1.1. Análisis de la Calidad de Energía del Suministro Eléctrico

Para el análisis de la energía que suministra la red eléctrica al cuadro de cargas perteneciente a los circuitos de iluminación LED se tiene en consideración el diagrama unifilar del sistema de iluminación que se presenta en el ANEXO A el cual pertenece a las cúpulas de la Catedral de la Inmaculada Concepción de Cuenca.

El análisis hecho al informe de la calidad de producto presentado a la fundación Iluminar por el departamento de calidad de energía de la empresa eléctrica CENTRO SUR [72], presenta un resumen de la medición de calidad del producto realizado al transformador y medidor de la Iglesia de la Catedral. La medición es realizada durante un periodo de siete días para lo cual se evaluaron los parámetros establecidos por la regulación 005/18 del ARCONEL “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica” [73].

En función a lo que establece la regulación 005/18 del ARCONEL, se debe evaluar los niveles de flicker, distorsión armónica, desequilibrio y nivel de voltaje en transformadores, durante un periodo de siete días continuos cada 10 minutos [73], para lo cual se exige cumplir los siguientes parámetros:

- Los límites del nivel de voltaje no deben superar el $\pm 8\%$ del valor nominal. El voltaje del transformador es 127 VAC, por lo tanto el rango es de 116.84 y 137.16 voltios fase – neutro.
- El flicker Pst no debe superar la unidad, es decir menor a la unidad.
- La distorsión armónica de voltaje THDv debe ser menor al 8% y la individual de 5%.
- El desequilibrio de voltaje en trifásicos debe ser menor 2%.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en función a los parámetros planteados según la Regulación 005/18.

4.1.1.1. Nivel de Voltaje de Suministro

En la presente figura 4.4 se observa el perfil de carga del voltaje que muestra el transformador en el lado de bajo voltaje, de los datos analizados el 0.5% de la fase A del total de registros, estuvo fuera del límite establecido por la Regulación; sin embargo, no existe incumplimiento debido a que el 95% de las muestras se encontró dentro del rango admisible.

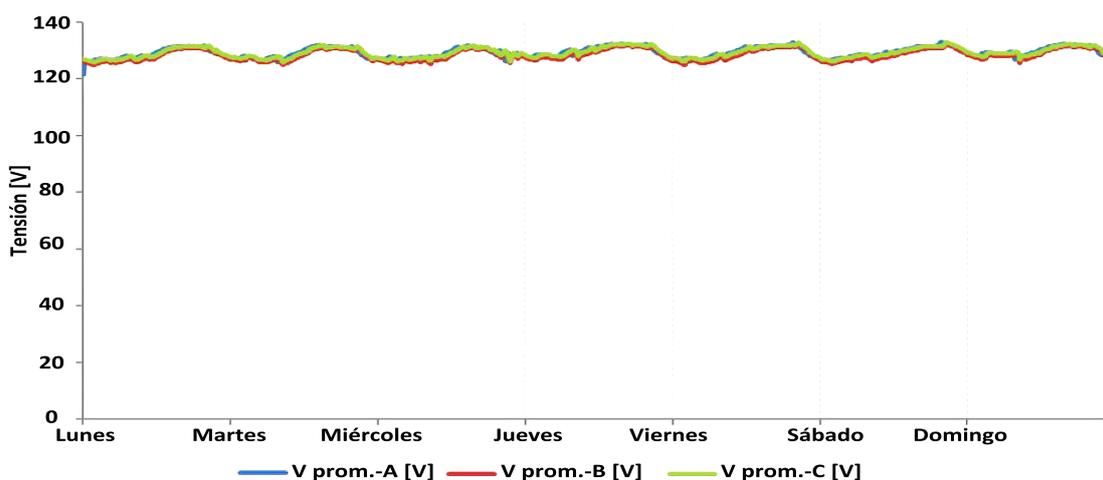


Figura 4.4: Análisis del nivel de voltaje de suministro.
Fuente:[72]

4.1.1.2. Variaciones Rápidas del Voltaje o Flicker

Para la realización del análisis de variaciones rápidas de voltaje se tiene como referencia los límites establecidos por la regulación 005/18 del ARCONEL, el cual indica que el límite para el índice de severidad del flicker debe ser menor que la unidad [73].

Se determina que no existe incumplimiento por cuanto el 0.2% de las fases A, B y C registrados, no sobrepasa el 5% de las muestras de medición, cuyo límite establecido por la regulación es de uno.

En la figura 4.5, se presenta el comportamiento de parpadeo luminoso Pst.

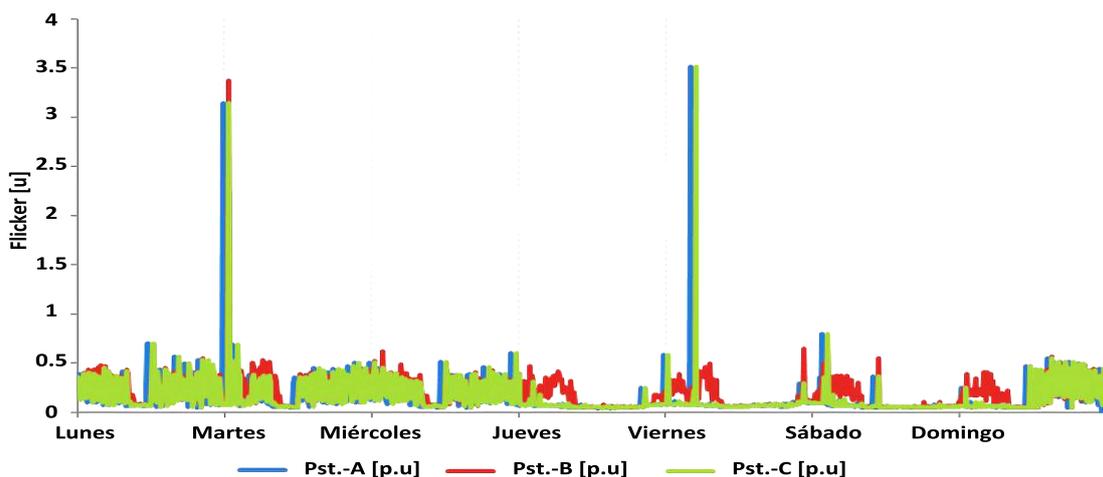


Figura 4.5: Análisis de las variaciones rápidas del voltaje o Flicker.
Fuente:[72]

4.1.1.3. Distorsión Armónica del Voltaje (THDv)

Al analizar la figura 4.6, se aprecia el perfil de distorsión armónica de voltaje en las fases A, B y C. Se puede observar que durante el encendido de las luminarias las fases presentan una distorsión armónica en el voltaje de aproximadamente 2.7 % esto se debe a que las cargas conectadas son de tipo no lineales y por lo tanto presenta una distorsión armónica durante su encendido.

Se observa que existe un promedio de 1.5 % de distorsión armónica del voltaje de las fases cuando las luminarias alcanzan sus valores de operación nominales por lo tanto no existe incumplimiento debido a que no se aprecian valores que sobrepasan los límites establecidos por la regulación 005/18 del ARCONEL, el cual indica que los límites máximos de armónicos de voltaje deben estar entre 5 % para armónicos individuales y 8 % para el total [73].

En la figura 4.6, se visualiza el perfil de la distorsión armónica de voltaje.

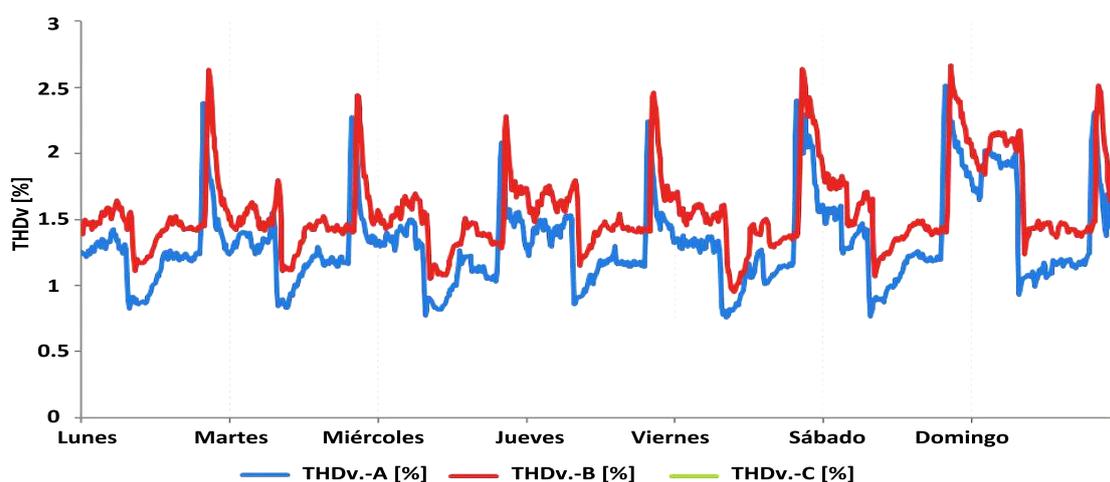


Figura 4.6: Análisis de la distorsión armónica del voltaje.
Fuente:[72]

4.1.1.4. Desequilibrio de Voltaje

Al analizar la figura 4.7, la cual presenta el perfil de desequilibrio del voltaje, se puede observar que durante el encendido de las luminarias se presenta un desequilibrio aproximado de 0.7 % esto se debe a que existe una corriente pico el encendido de las luminarias.

Según lo establecido, el valor límite para el índice de desequilibrio de voltaje en un punto de medición deberá ser el 2 % para todos los voltajes. Durante la medición se puede notar que no existen registros fuera del límite establecido.

En la figura 4.7, se muestra el perfil de análisis del desequilibrio del voltaje.

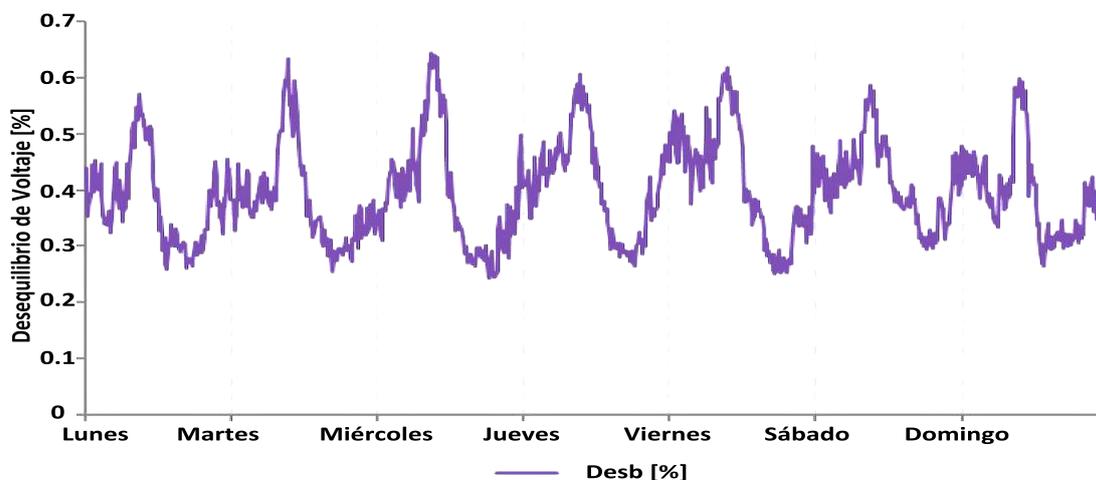


Figura 4.7: Análisis del desequilibrio de voltaje.

Fuente:[72]

La tabla 4.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos de la medición de los parámetros descritos para el punto de entrega del servicio, indicando que los niveles cumplen con los requerimientos de la norma 005/18 del ARCONEL.

Tabla 4.2: Resumen del cumplimiento de los indicadores de calidad.

Fuente: Autor

Indicador	Cumplimiento
Nivel de voltaje	Cumple
Flicker (Pst)	Cumple
Distorsión armónica total de voltaje (THDv)	Cumple
Desequilibrio de voltaje %	Cumple

4.1.2. Análisis de la Variación de Corriente y Voltaje en los Circuitos de Iluminación LED de las Cúpulas

El análisis de la corriente y voltaje es fundamental para determinar posibles fallas dentro del sistema eléctrico. Para la obtención de datos se cuenta con el dispositivo de calidad de energía que es colocado en cuadro de cargas de las cúpulas.

La información que presentó el registrador se analiza las corrientes y voltajes máximos que de las fases de alimentación de los circuitos correspondientes a la iluminación LED de las cúpulas de la catedral de la Inmaculada Concepción de Cuenca.

4.1.2.1. Voltaje Máximo

Los límites del nivel de voltaje no deben superar el $\pm 8\%$ del valor nominal, el voltaje del transformador que es 127 VAC, por lo tanto, el rango permitido es de 116.84VAC y 137.16 VAC.

En la figura 4.8, se observa el comportamiento de los voltajes que tienen las líneas de alimentación durante el encendido de las luminarias LED. Se puede evidenciar que no existen cambios bruscos de tensión durante el encendido de las luminarias.

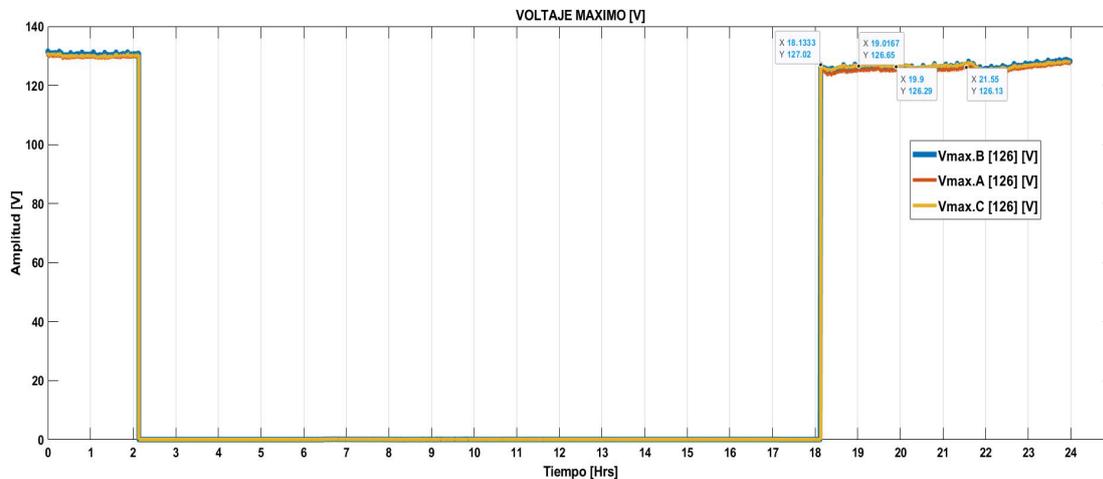


Figura 4.8: Voltaje máximo de las líneas de alimentación.
Fuente: Autor

En la figura 4.9, se visualiza los valores de tensión durante el encendido de las luminarias LED.

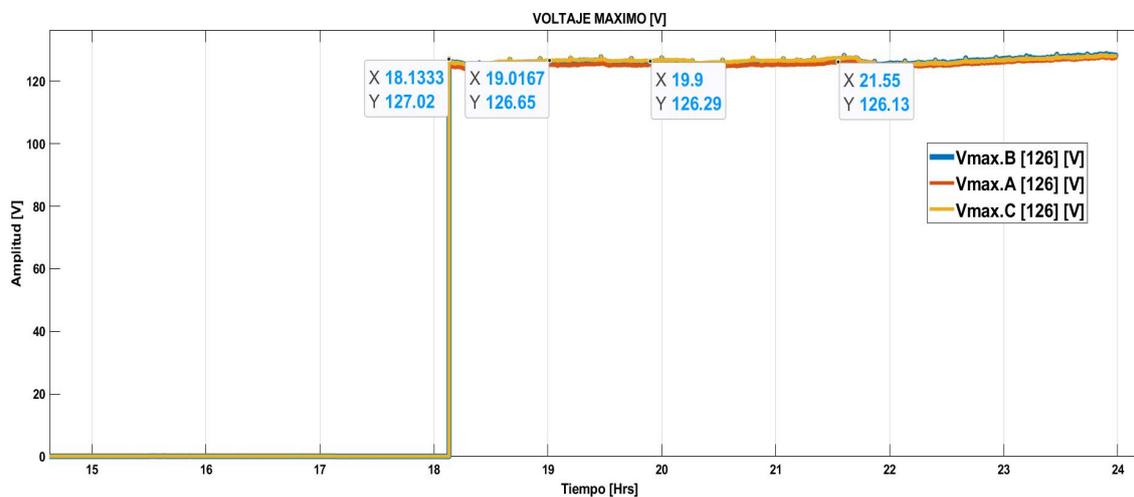


Figura 4.9: Análisis de los voltajes máximos de las líneas de alimentación.
Fuente: Autor

La tabla 4.3 muestra los valores de los voltajes máximos que alcanza cada línea de alimentación durante el encendido de las luminarias.

Tabla 4.3: Voltajes máximos de las líneas de alimentación.
Fuente: Autor

Líneas de alimentación	Voltaje máximo [VAC]
L1	126
L2	126
L3	126

4.1.2.2. Corriente Máxima de las Líneas de Alimentación

Se procedió a realizar el análisis de los registros de las corrientes máximas de cada línea de alimentación con el fin de conocer el comportamiento que tiene la corriente durante el encendido de las luminarias LED.

En la figura 4.10, se muestra el comportamiento que tienen las corrientes de fases o líneas de alimentación durante el encendido de las luminarias.

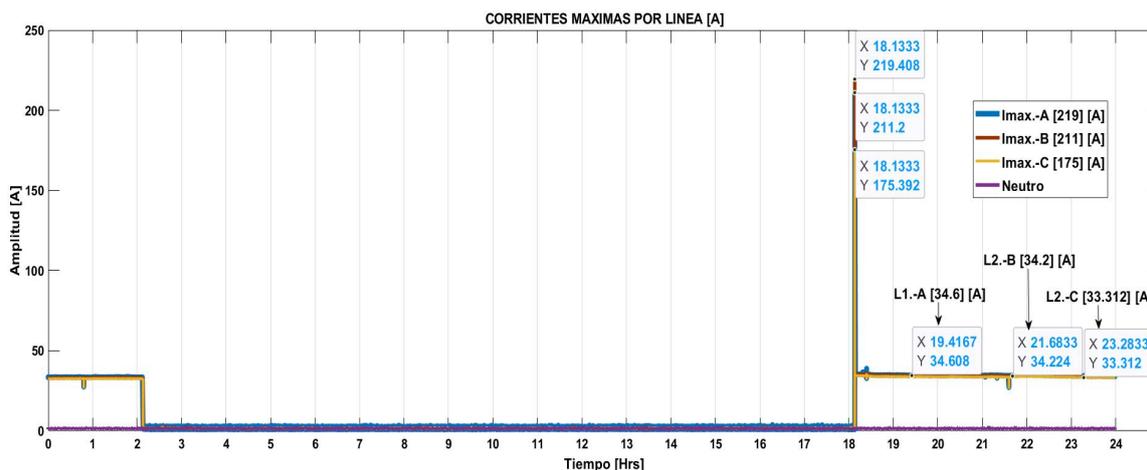


Figura 4.10: Corrientes máximas de las líneas de alimentación.
Fuente: Autor

En la figura 4.11, se contempla que existen unos picos de corriente que superan hasta cinco y seis veces la corriente nominal de cada fase, estas sobrecorrientes duran menos de un segundo y luego pasa a estabilizarse a sus corrientes nominales, lo que indica que las sobrecorrientes corresponden a las corrientes de pico en frío o corrientes de irrupción producidas por las luminarias LED.

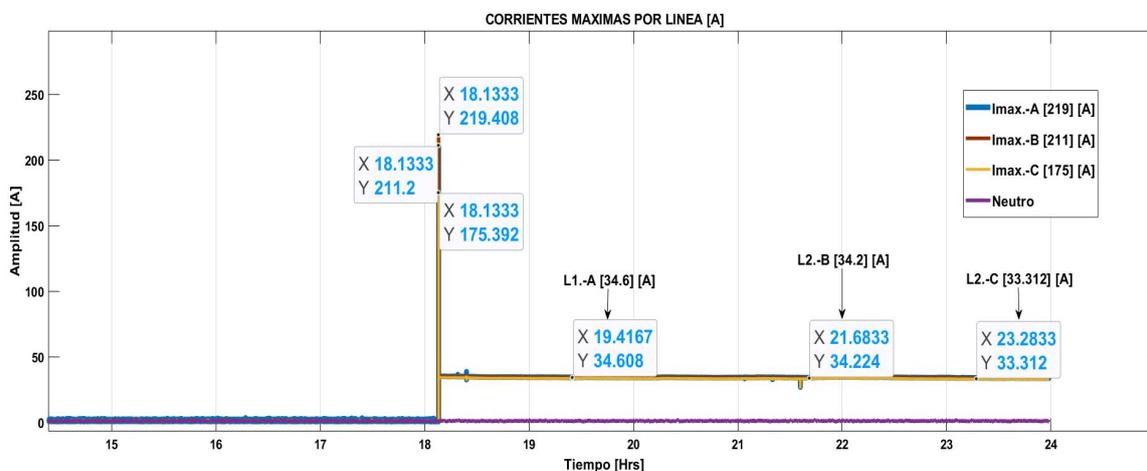


Figura 4.11: Análisis de las corrientes máximas de las líneas de alimentación.
Fuente: Autor

La tabla 4.4 muestra los valores de las corrientes máximas y nominales de cada fase obtenidas durante el encendido de las luminarias LED.

Tabla 4.4: Corrientes máximas y nominales de cada línea de alimentación.

Fuente: Autor

Líneas de alimentación	Corriente máxima [A]	Corriente nominal [A]
L1	219	34.6
L2	211	34.2
L3	175	33.3

4.1.2.3. Corriente Máxima del Sistema

Se analizó el registro de la corriente máxima del sistema de iluminación con el objetivos de identificar la corriente máxima que llega a tener todo el sistema de iluminación LED durante el encendió de sus luminarias.

En la figura 4.12, se observa el comportamiento que tiene la corriente del sistema durante el encendido.

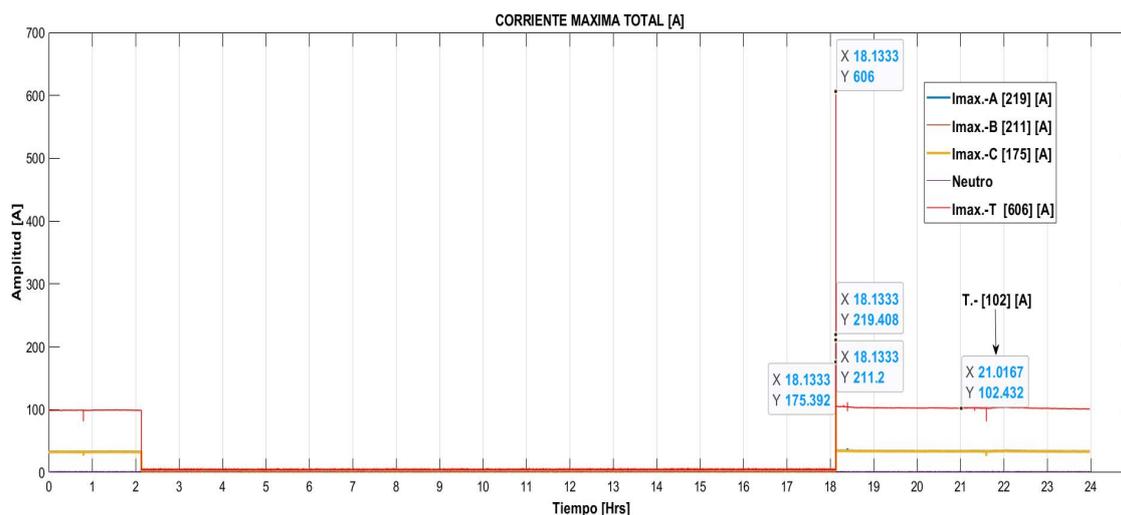


Figura 4.12: Corriente máxima total del sistema.

Fuente: Autor

En la figura 4.13, se procedió con el análisis de los registros de las corrientes máximas totales consumida por el sistema, en el cual se observa que existe un pico de corriente de aproximadamente 600 A, seis veces más que su corriente nominal, lo que provoca problemas en la activación de sus protecciones. Estas corrientes corresponden a la medición del analizador de calidad energía de las tres fases que alimentan al tablero de distribución.

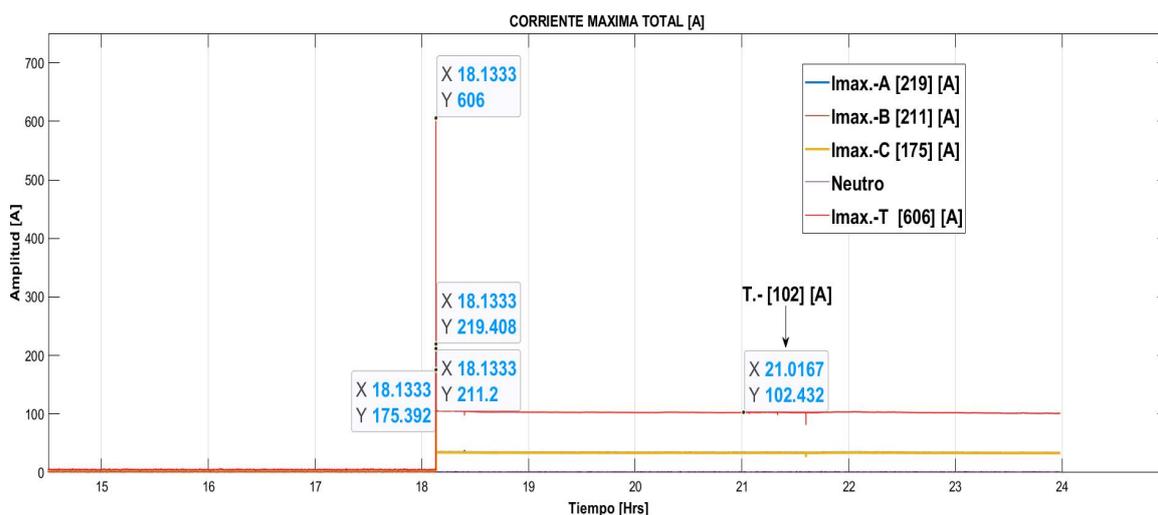


Figura 4.13: Análisis de la corriente máxima total del sistema.
Fuente: Autor

En la tabla 4.5 se muestran las corrientes máximas totales y nominales de cada fase obtenidas durante el encendido de las luminarias LED.

Tabla 4.5: Corriente máxima del sistema de iluminación.
Fuente: Autor

Líneas de alimentación	Corriente máxima [A]	Corriente nominal [A]
L1	219	34.6
L2	211	34.2
L3	175	33.3
IT	606	100

4.1.2.4. Voltaje y Corriente Máxima del Sistema

Se ha procedido con el análisis de los registros de corriente y voltaje máxima del circuito de iluminación de las cúpulas; encontrándose una corriente mayor a 600 A, a las 18:10 hrs durante el encendido de las luminarias LED, para luego normalizarse a 100 A como se puede visualizar en la figura 4.14.

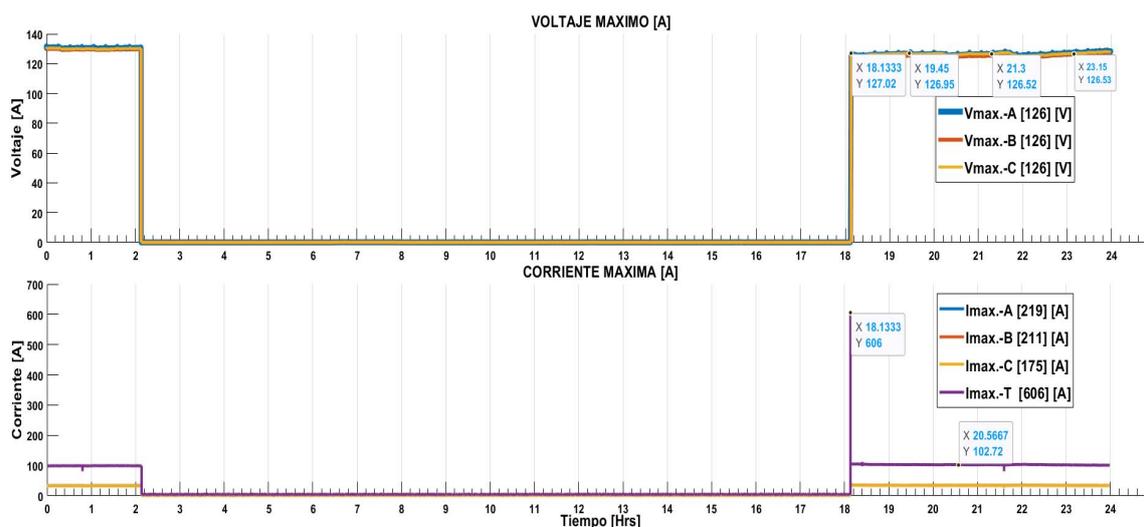


Figura 4.14: Corriente y voltaje máximo durante el encendido.
Fuente: Autor

En la figura 4.15, se presenta análisis del voltaje máximo con respecto a la corriente máxima para determinar si existe alguna caída o distorsión en el voltaje durante el encendido de las luminarias LED. Se evidenció que el voltaje máximo no presenta distorsión alguna en ninguna de sus fases durante el pico de corriente que presentan las luminarias LED.

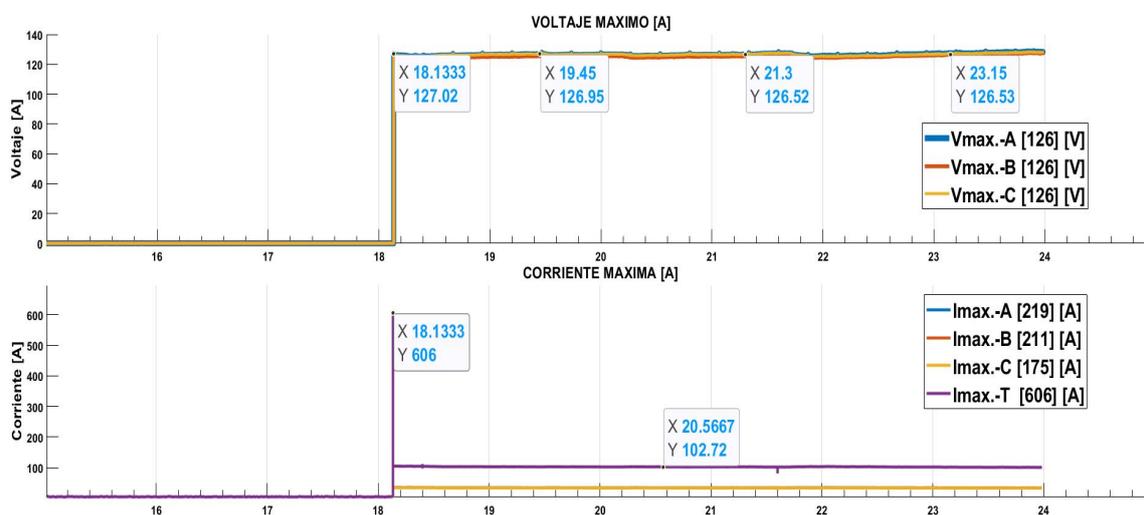


Figura 4.15: Análisis de la corriente y voltaje máximo durante el encendido.
Fuente: Autor

La tabla 4.6 muestra los valores obtenidos de corriente y voltaje durante el encendido de las luminarias LED.

Tabla 4.6: Resumen de los valores de voltaje y corriente durante el encendido de las luminarias LED.

Fuente: Autor

Líneas de alimentación	Corriente máxima [A]	Corriente nominal [A]	Voltaje máximo [V]
L1	219	34.6	126
L2	211	34.2	126
L3	175	33.3	126
IT	606	102.5	127

4.2. Pruebas del Laboratorio de una Luminaria Lineal LED de 72W

Para las pruebas realizadas en el laboratorio se tiene en cuenta los valores de tensión y corriente ya que, existe una relación mutua entre las dos, cuando hay problemas de corrientes de irrupción también se tiene problemas de sobretensión.

4.2.1. Pruebas de Corriente y Voltaje

La relación entre la sobretensión y la corriente de irrupción de las luminarias LED ocasionan irregularidades en cualquier parte del circuito, por ejemplo, las protecciones de entrada [2].

Una característica que se presenta en el encendido de una luminaria LED es la variación de la tensión y corriente, es decir, si la corriente de irrupción es muy grande provocará una caída de voltaje [74].

Para realizar la medición del voltaje como de la corriente, se cuenta con una luminaria lineal LED de 72W, como se visualiza en la figura 4.16 que pertenece al circuito C1 de la cúpula central de la catedral de la Inmaculada Concepción de Cuenca, como se puede ver en el anexo A.

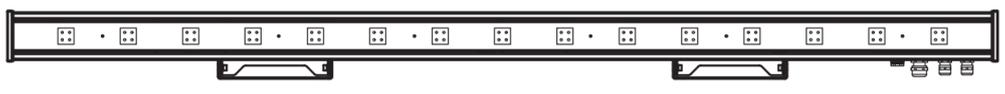


Figura 4.16: Lámpara lineal PARADE S de 72W.

Fuente: Autor

Las características principales de esta luminaria lineal cuenta con un alto flujo de luz y luminancia que van agrupados en 4 LEDs blancos dinámicos cada uno y tiene un total de 15 grupos de LEDs.

Una vez conocidos los aspectos técnicos de la luminaria lineal, se procede a realizar la medición de tensión y corriente para lo cual se tuvo en cuenta el voltaje de operación de 220 VAC.

Para estas mediciones se cuenta con un osciloscopio, una sonda de tensión, sonda de corriente y una fuente variable de tensión VAC. En la figura 4.17 se visualiza un diagrama de bloques de la conexión de los equipos.

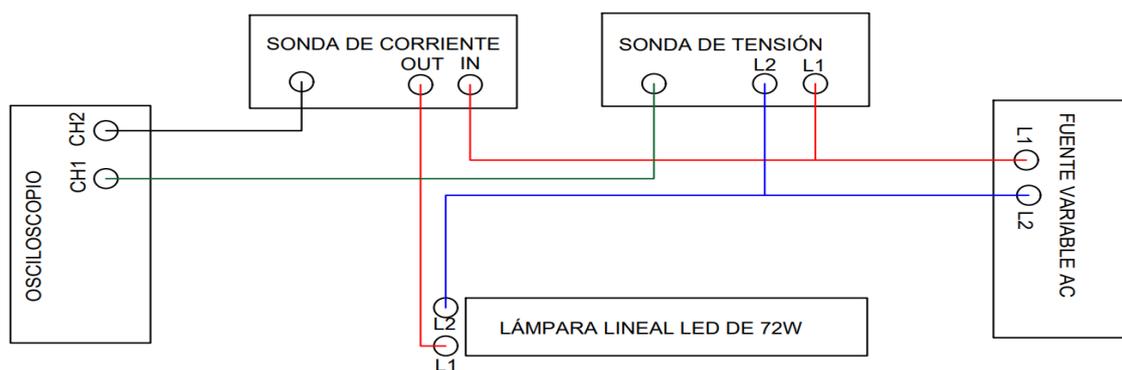


Figura 4.17: Diagrama de bloques de la conexión de los equipos.

Fuente: Autor

Para la obtención de la señal de tensión y corriente de irrupción, las pruebas se realizan en el momento de encendido de la luminaria, durante las pruebas, se realizaron al menos tres medidas con la misma tensión de alimentación, logrando así obtener el valor máximo de la corriente de irrupción. Cada medición hecha, está en función de las características técnicas del fabricante para garantizar el correcto funcionamiento operativo del equipo.

Capítulo 5

Propuestas en Base a Simulaciones de Sistemas de Arranque Suave

La corriente de irrupción que presentan las luminarias LED de alta potencia dentro de los circuitos de iluminación, afectan de manera directa el funcionamiento de las mismas, es por ello, que se analiza la corriente pico de la luminaria lineal LED de alta potencia la cual esta presente en la iluminación de las cúpulas. Para limitar estas corrientes se proponen sistemas de arranque suave en base a limitadores de corriente de tipo activo, a través de simulaciones que determinan la eficiencia de los mismos.

5.1. Análisis y Simulación de la Corriente de Irrupción de una Luminaria LED

Para el análisis de la corriente de irrupción, se cuentan con la respuestas de voltaje y corriente de encendido directo de la luminaria lineal LED de 72W, estas mediciones fueron realizadas en el laboratorio de la UPS.

5.1.1. Establecimiento de Parámetros de la Corriente de Irrupción

Al realizar las pruebas de encendido directo en la luminaria LED se obtuvieron las señales de voltaje y corriente, con el objetivo de obtener los parámetros que permitan analizar la corriente de irrupción.

Al analizar la figura 5.1, se puede visualizar de color rojo la corriente de irrupción que produce la luminaria LED durante su encendido, esta corriente está presente en un corto lapso de tiempo alcanzando un valor máximo de 21.6 A para luego estabilizarse a la corriente nominal del equipo.

En la figura 5.1, se visualiza la señal de voltaje y corriente durante el encendido de la luminaria LED de 72W, las cuales se obtuvieron de las pruebas realizadas en el laboratorio de la UPS.

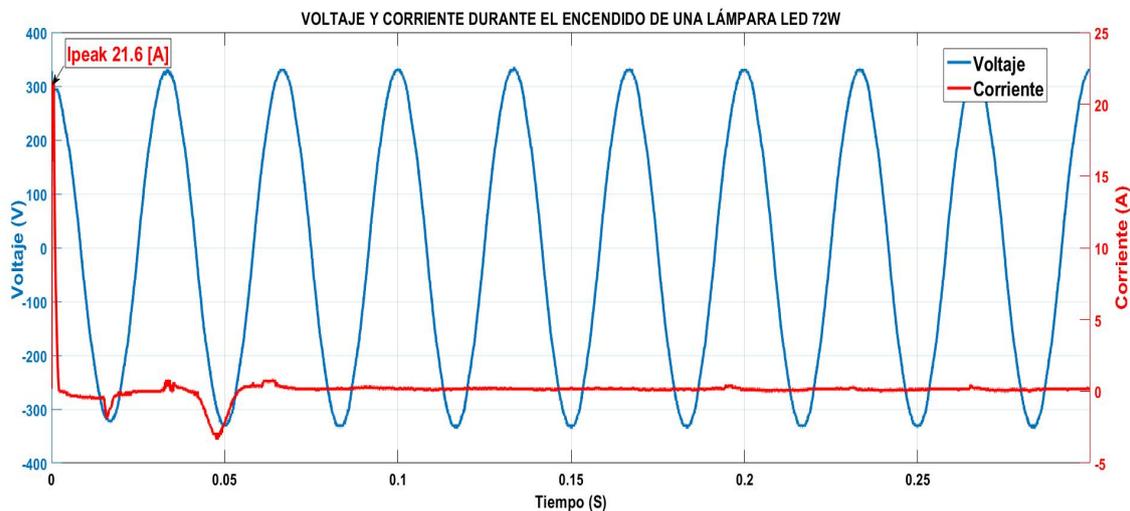


Figura 5.1: Señal de corriente y voltaje durante el encendido de la luminaria LED.

Fuente: Autor

Después de que haya pasado la corriente de irrupción, se observar el voltaje y corriente de la luminaria LED en su funcionamiento nominal o permanente. Al analizar la corriente de irrupción que presenta la luminaria LED durante su encendido podemos visualizar que es 55 veces más grande que su corriente nominal, la cual es aproximadamente 0.39 A.

En la figura 5.2, se puede observar los valores nominales de voltaje y corriente de la luminaria LED.

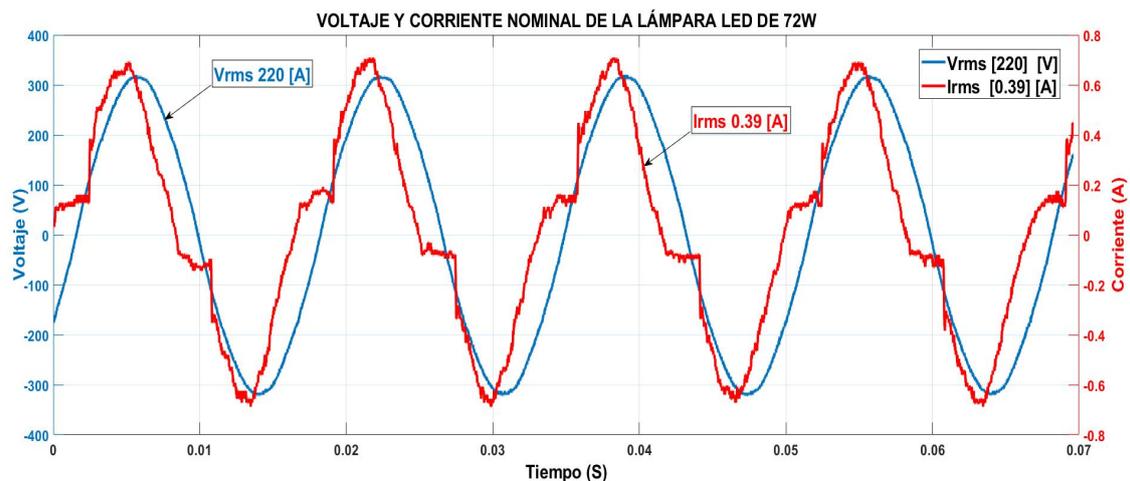


Figura 5.2: Análisis del voltaje y corriente nominal de la luminaria LED.

Fuente: Autor

En la figura 5.3, se muestra la señal de voltaje y corriente más detalladamente, donde se observa de color azul el voltaje de entrada el cual no se ve afectado de manera directa por el arranque en el encendido de la luminaria LED.

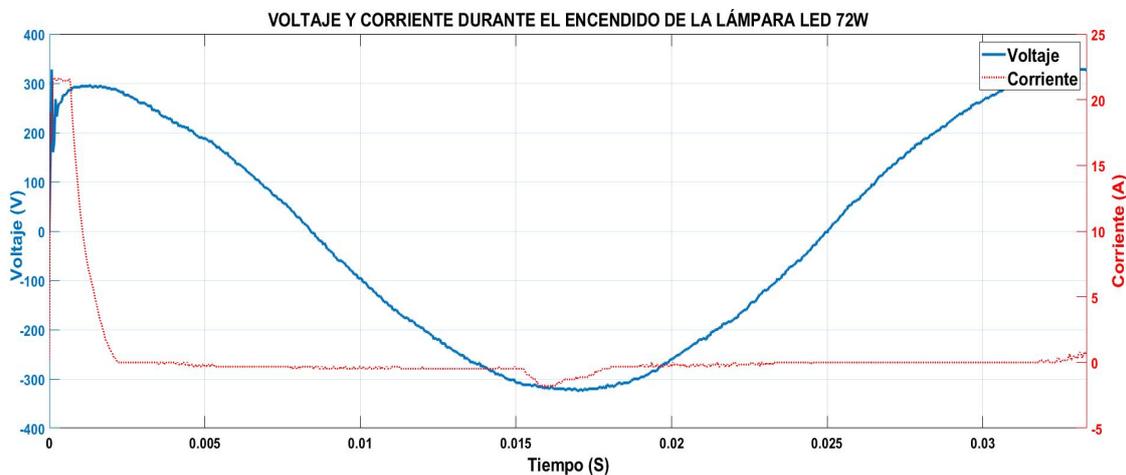


Figura 5.3: Análisis del voltaje durante el encendido de la luminaria.
Fuente: Autor

Para la simulación de la corriente de irrupción provocada por la luminaria LED de 72W, es necesario analizar esta corriente más detalladamente para obtener resultados más cercanos a las tomados en el laboratorio.

Para el análisis de la corriente de irrupción se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros de medición; corriente máxima (Ipeak) y la duración del pico de corriente (tH50), la cual se mide al 50 % de la corriente máxima (Ipeak*0.5) [30].

En la figura 5.4, se muestra más detalladamente el análisis correspondiente a la corriente de irrupción provocada por la luminaria LED.

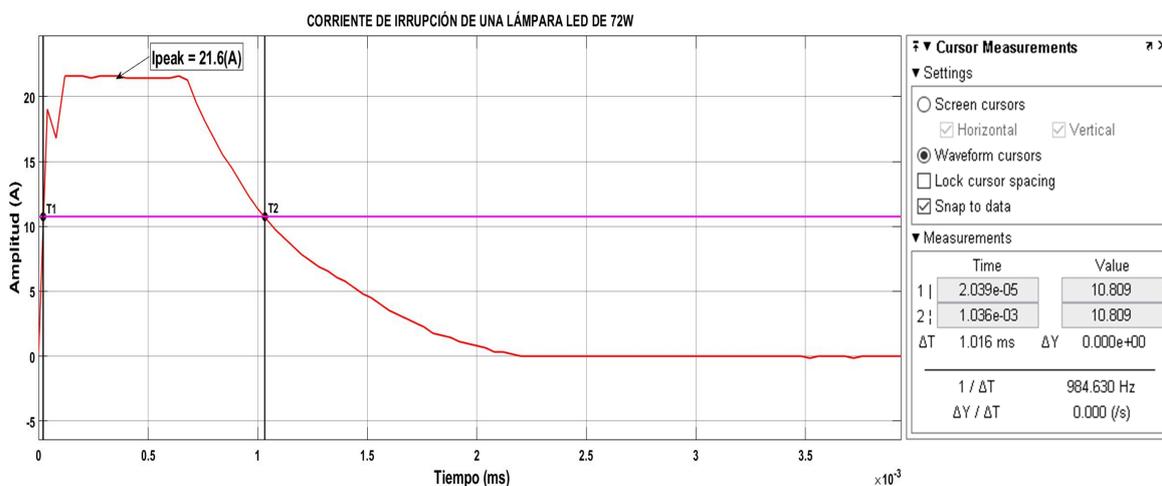


Figura 5.4: Análisis del voltaje durante el encendido de la luminaria.
Fuente: Autor

Los valores obtenidos son:

- Corriente máxima: 21.6 A.
- Duración del pico de corriente: 1.011 ms.

5.1.2. Respuesta Experimental de la Corriente Irrupción

Todas las luminarias LED modernas tienen una fuente de alimentación conmutada como fuente de alimentación, ya que este es un dispositivo electrónico que convierte la corriente alterna de la red eléctrica en una tensión continua necesaria para suministrar energía a la electrónica interna de la luminaria LED [75].

En función de lo descrito sobre la corriente de irrupción y el origen que lo provoca en la figura 5.5, se puede observar un esquema de una fuente de alimentación simplificada, en la cual la corriente de irrupción es producida por su condensador en la etapa de filtrado.

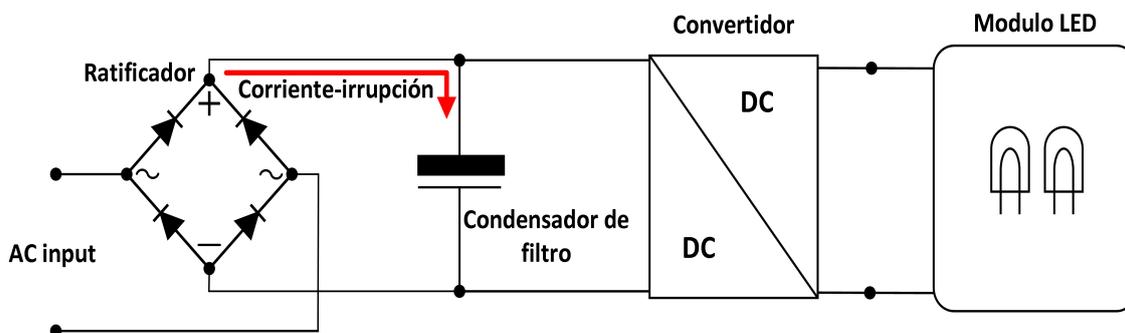


Figura 5.5: Esquema simplificado de una fuente de alimentación conmutada.
Fuente: Autor

A partir del modelo simplificado de una fuente de alimentación conmutada se propuso un modelo de simulación en función de las características técnicas de la luminaria LED utilizada en el laboratorio.

En la figura 5.6, se observa el diagrama de simulación propuesto para el análisis de la corriente de irrupción.

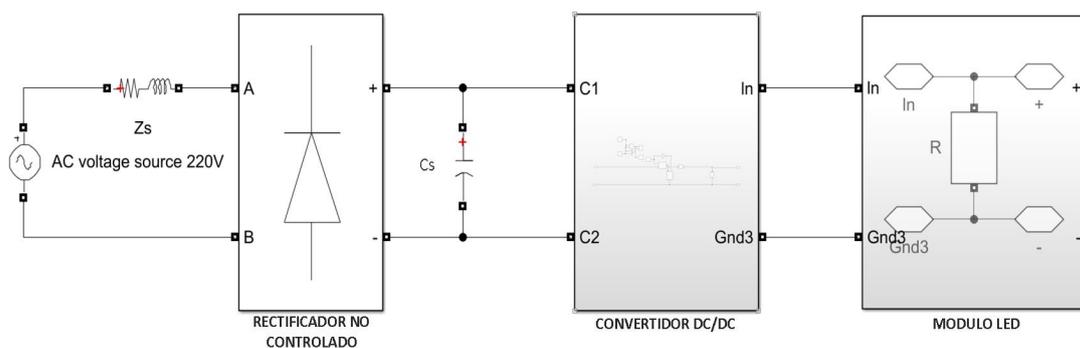


Figura 5.6: Diagrama de simulación para la corriente de irrupción.
Fuente: Autor

En función de los parámetros técnicos establecidos por el fabricante de la luminaria LED se procede a realizar un diseño que cumpla con los valores técnicos.

La tabla 5.1 detalla los parámetros técnicos propuestos por el fabricante para la luminaria LED.

Tabla 5.1: Valores técnicos de una luminaria LED de 72W

Fuente: Autor

Valores técnicos propuestos por el fabricante		
Voltaje [V _{rm}]	Potencia [W]	Corriente [I _{rm}]
220	72	0.5

En la figura 5.7, se muestran los parámetros medidos en función de la carga de la luminaria LED y las especificaciones técnicas dadas por el fabricante .

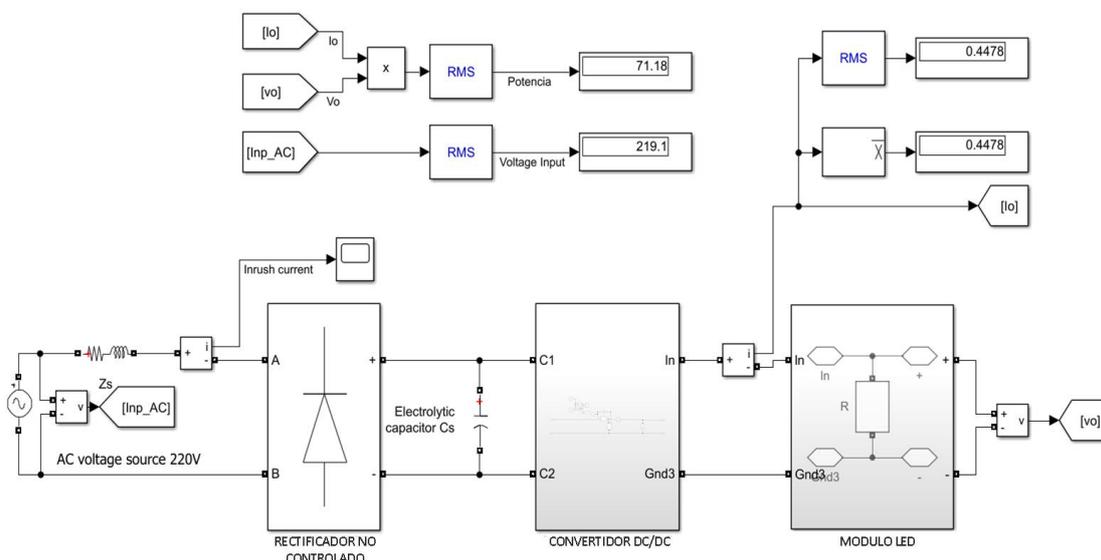


Figura 5.7: Diagrama de medición en función de la carga.

Fuente: Autor

La tabla 5.2 presenta los valores obtenidos mediante simulación por el Software Simulink en función de los parámetros establecidos por el fabricante para la luminaria LED.

Tabla 5.2: Valores obtenidos de simulink

Fuente: Autor

Valores de simulación		
Voltaje [V _{rm}]	Potencia [W]	Corriente [I _{rm}]
219	71.18	0.45

La corriente de irrupción es causada por la carga de los condensadores en las fuentes de alimentación, independientemente de la unidad, ya sea una fuente de alimentación de baja potencia montada en PCB o una unidad de alto rendimiento para equipos integrados o montaje en riel, la corriente de pico de entrada no puede derivarse necesariamente de la clasificación de la fuente de alimentación [75].

Entender el funcionamiento exacto de una fuente conmutada no es demasiado importante, pero la etapa de entrada de estos dispositivos suele ser como la figura 5.8.

En la figura 5.8, se visualiza el diagrama de simulación propuesto para el análisis de la corriente de irrupción el cual corresponde a la etapa de filtrado del dispositivo.

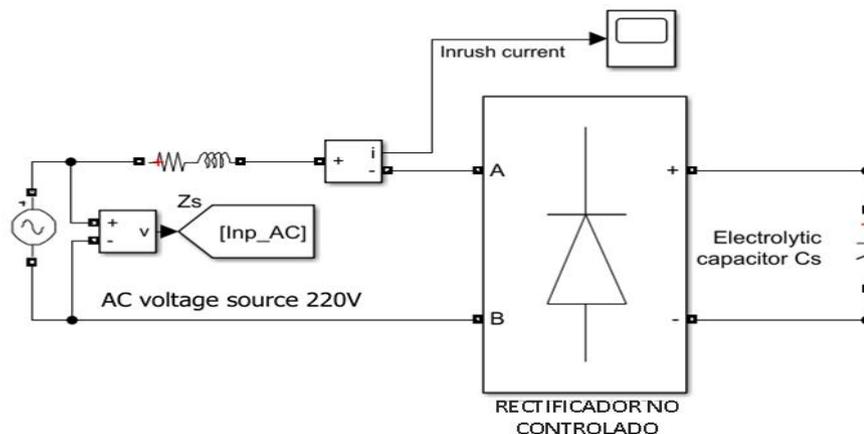


Figura 5.8: Etapa de arranque.
Fuente: Autor

La figura 5.9, se visualiza la señal obtenida por simulación de la corriente pico de la luminaria de 72 W realizada en el laboratorio. Los parámetros a analizar son los siguientes; corriente máxima (I_{peak}) y la duración del pico de corriente la cual se mide al 50 % de la corriente máxima ($I_{peak} \cdot 0.5$) [30].

En la figura 5.9, se observa más detalladamente el análisis correspondiente a la corriente de irrupción simulada.

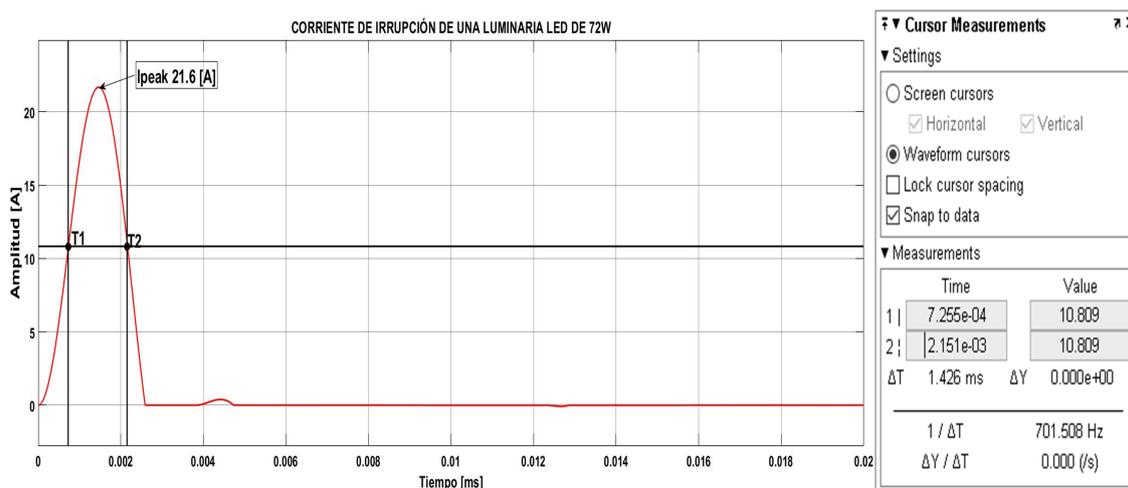


Figura 5.9: Corriente de irrupción.
Fuente: Autor

La tabla 5.9 muestra los valores obtenidos de la corriente de irrupción a través de simulación los cuales son aproximados a los valores reales de la medición de la luminaria lineal de 72 W.

Tabla 5.3: Análisis de la corriente de irrupción

Fuente: Autor

Corriente de irrupción medida		Corriente de irrupción simulada	
Ipeak [A]	Duración [ms]	Ipeak [A]	Duración [ms]
21.6	1.016	21.6	1.42

5.1.2.1. Análisis de la Corriente de Irrupción en Conexión Paralela

Para evaluar el comportamiento que tiene la corriente de irrupción en una conexión en paralelo, se presenta el siguiente esquema en el cual se ha conectado dos luminarias LED en paralelo a la fuente de alimentación, los modelos utilizados para la representación de luminarias LED corresponden al modelo presentado en la figura 5.10.

En el modelo de simulación propuesto para el análisis de la corriente de irrupción, se puede observar que los modelos utilizados tienen las mismas características eléctricas de funcionamiento y están conectados a la misma fuente de alimentación, lo que provocará que la corriente de arranque se vaya incrementándose en función del número de luminarias LED que vayan conectando, tal como se observa en la figura 5.10.

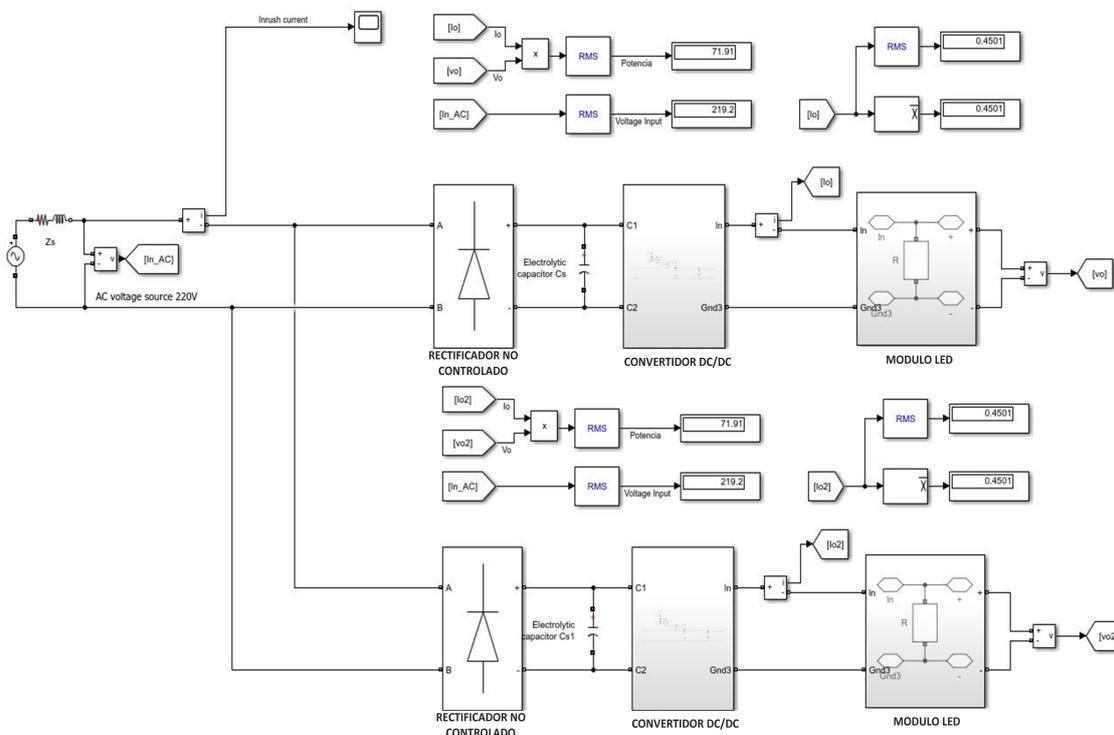


Figura 5.10: Diagrama de conexión en paralelo de luminarias LED.

Fuente: Autor

En la figura 5.11, se visualiza el comportamiento de la corriente de entrada de dos luminarias LED conectadas en paralelo, de color azul se observa la corriente de irrupción que tiene una luminaria LED al momento de su encendido y de color rojo la corriente de irrupción provocada por las dos luminarias LED en paralelo.

Al analizar el comportamiento de la corriente de arranque que tienen las dos luminarias LED conectadas en paralelo se puede observar que la corriente de irrupción se incrementa prácticamente el doble llegando a una corriente pico de 41 A.

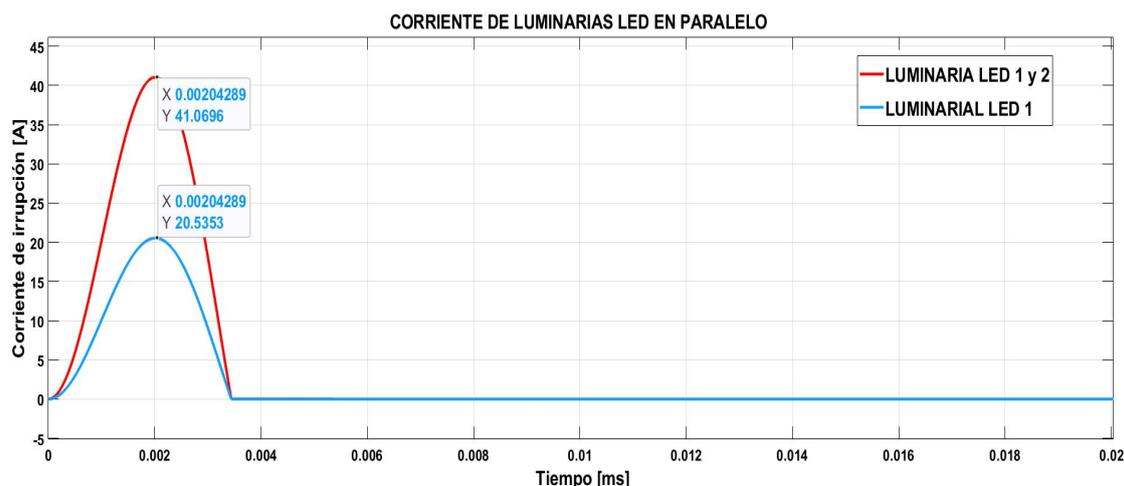


Figura 5.11: Corriente de irrupción de dos luminarias LED conectadas en paralelo.

Fuente: Autor

5.2. Análisis y Simulación de las Propuestas del Sistema de Arranque Suave

Al encender dos o más luminarias de la misma potencia al mismo tiempo, la corriente de irrupción total se aproxima a la multiplicación de la corriente de irrupción única, para un número mayor de luminarias cabe esperar un resultado similar.

Un sistema de arranque suave para luminarias LED permitirá reducir la corriente de arranque en el momento del encendido, para lo cual se propone los siguientes modelos.

5.2.1. Arranque Suave por Temporización Simultánea

Muchos fabricantes de iluminación LED proporcionan una tabla que detallan el número de controladores LED que se pueden conectar a un dispositivo de protección, pero esto sólo debe considerarse como una orientación general, puesto que, no se puede aplicar con precisión a todos los dispositivos de protección.

La corriente de arranque en un circuito de iluminación LED se ve afectada por la corriente de irrupción que este pueda provocar al momento de encender todas las luminarias LED al mismo tiempo, cómo principio general para evitar disparos indeseados en los

dispositivos de protección, no se deben encender todas las luminarias al mismo tiempo, ya que, el número de controladores o drivers LED conectados a un mismo MCB/RCBO aumentan la corriente de irrupción.

Se presenta un modelo de simulación que permita analizar el comportamiento de la corriente de irrupción, en el modelo propuesto se observa el uso de un relay el cual se activará en el segundo ciclo de onda de la señal de alimentación VAC, esto permitirá tener un arranque temporizado de la segunda luminaria LED.

Para la simulación se puede observar que los modelos utilizados para representar las luminarias LED están conectados en paralelo a la misma fuente de alimentación y tienen las mismas características eléctricas de funcionamiento que los modelos presentados anteriormente tal como se puede observar en la figura 5.11.

El uso de un relay permitirá tener un arranque temporizado, ya que, al retrasar el encendido de la segunda luminaria LED, la corriente de irrupción no se incrementa, puesto que al encender la segunda luminaria después un lapso de tiempo la corriente de irrupción de esta se verá desplazada a través del tiempo lo que permitirá reducir la corriente de irrupción inicial.

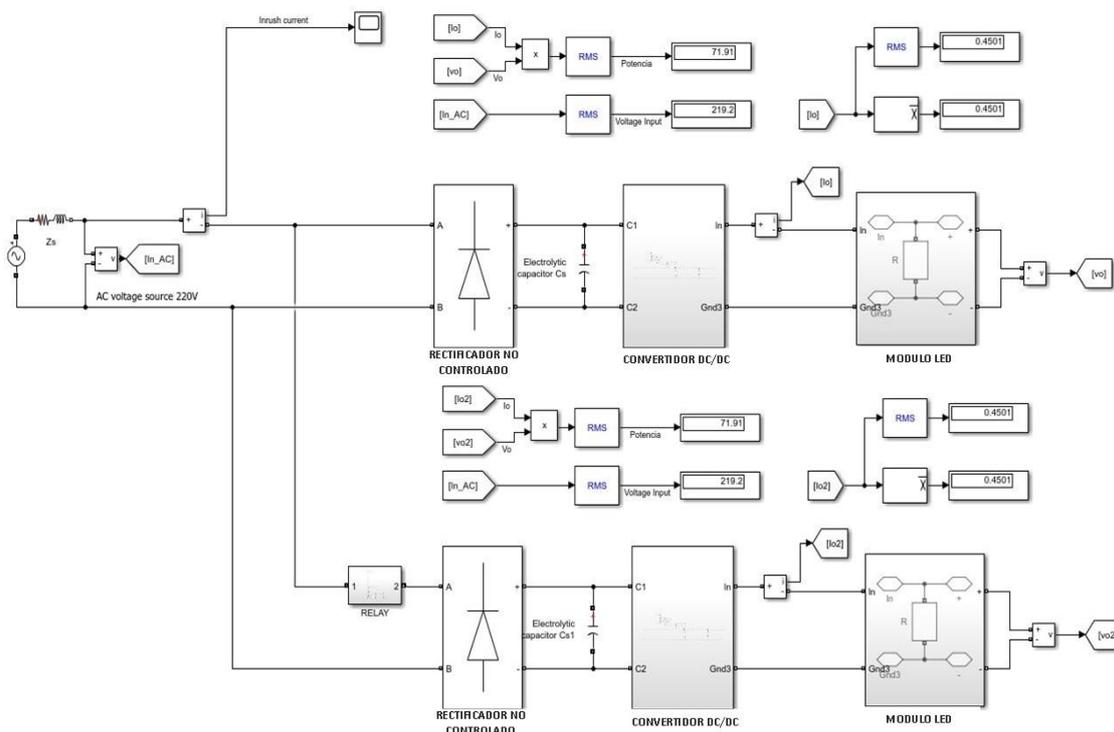


Figura 5.12: Diagrama de conexión con relay de retardo.

Fuente: Autor

Al analizar el comportamiento de la corriente de arranque que tienen las dos luminarias LED conectadas en paralelo, se aprecia que en la figura 5.13 no existe una corriente de irrupción inicial que sea perjudicial para los dispositivos de protección. Al usar un

relay para controlar el encendido de la segunda luminaria se pudo reducir la corriente de irrupción inicial que se produce al momento del encendido directo de un circuito de iluminación LED.

Este tipo de arranque suave se lo puede realizar mediante dispositivos de uso externo como un temporizador o relay´s o mediante luminarias LED que tengan integrado algún dispositivo que permita controlar el encendido.

La tabla 5.4 muestra los tiempos de activación de las luminarias LED para reducir la corriente de irrupción inicial en el momento del encendido.

Tabla 5.4: Tiempo de activación de las de las luminarias por relay.

Descripción	Tiempo de activación
Luminaria 1	periodo 1 (0-16.67ms)
Luminaria 2	periodo 2 (16.67-33.33 ms)

En la figura 5.13, se observa de color rojo la corriente pico que tiene una luminaria LED al momento de su encendido y de color azul la corriente pic de la segunda luminaria.

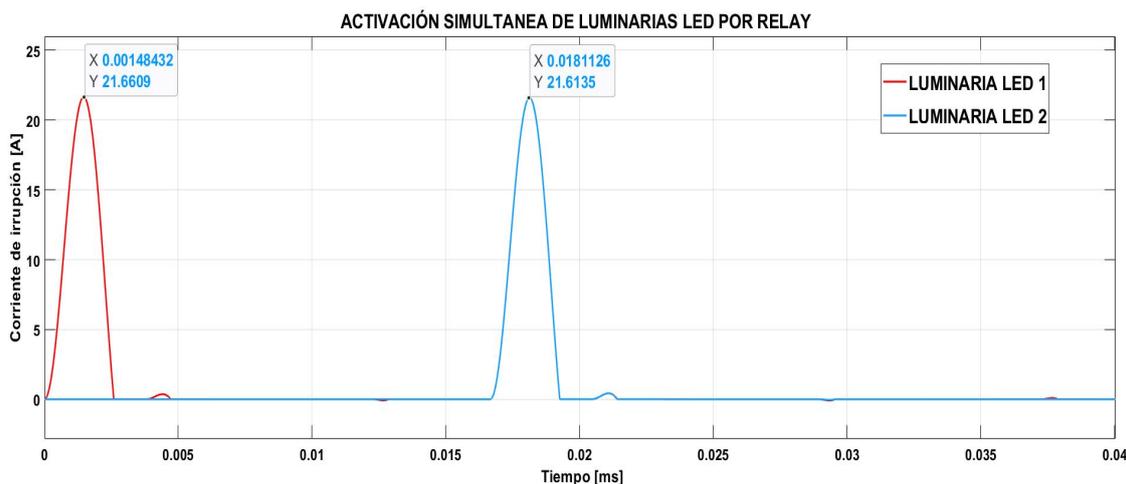


Figura 5.13: Corriente de irrupción de dos luminarias LED con control por relay.

Fuente: Autor

5.2.2. Arranque Suave por Bypass

La gran mayoría de los ICL que son utilizados como sistemas de arranque suave son de tipo activo, pero un método muy utilizado para reducir la corriente de irrupción que se produce en el encendido de las luminarias LED consiste en: utilizar una resistencia de valor conocido en serie al controlador o conjunto de controladores para limitar, mediante este resistor, el valor de la corriente de entrada, que tiende a valores infinitos o muy elevados.

El sistema de arranque suave por bypass es la combinación de un ICL que incorpora un sistema de alimentación que controla un temporizador y una resistencia en serie a una

de sus conexiones, en el cual podemos ajustar la conexión y desconexión mediante el relé interno del ICL.

Para este propósito, se puede utilizar el interruptor de retardo (relé de retardo), ya que, después de aplicar tensión, la corriente fluye a través de la bobina del relé (contactor) y la resistencia, la caída de tensión en R es pequeña. Después de un tiempo, la bobina del relé obtiene el voltaje completo y el relé se enciende, desconecta la resistencia R y cortocircuita el arrancador, haciendo que el relé esté permanentemente encendido.

Los modelos utilizados para representar las luminarias LED tienen las mismas características eléctricas de funcionamiento y el ICL por bypass se encuentra conectado a la segunda luminaria.

En la figura 5.14, se visualiza el modelo de simulación propuesto para el análisis de la corriente de irrupción, al igual que los modelos anteriores, se mantiene la misma conexión en paralelo.

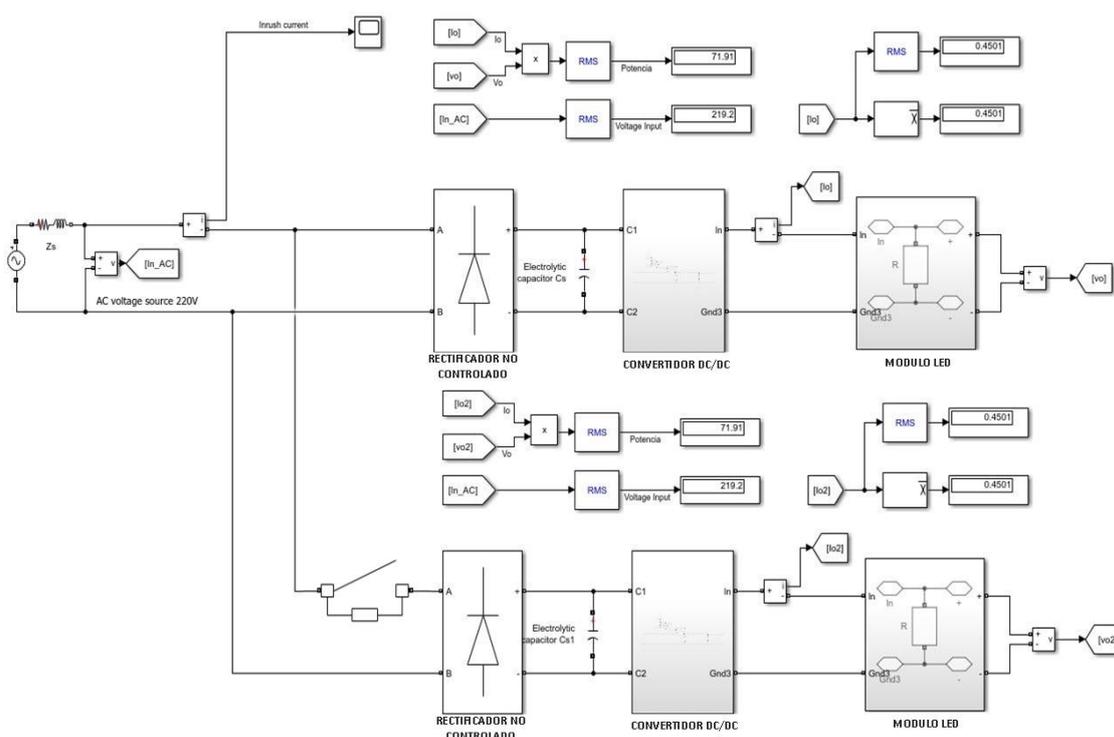


Figura 5.14: Diagrama de conexión con bypass.

Fuente: Autor

Al analizar el comportamiento de la corriente de arranque de las dos luminarias LED conectadas en paralelo, se puede observar que no existe una corriente de irrupción inicial que sea perjudicial para los dispositivos de protección. Al usar un ICL por bypass se pudo reducir la corriente de irrupción hasta 13 veces menos, de tal forma, con la resistencia conectada a la línea de alimentación podemos controlar el valor de la corriente de arranque, considerando el valor normalizado de la tensión de suministro de 220 VAC (RMS).

Para el caso de simulación, con una resistencia de 10 ohms, el valor del pico de corriente de arranque fue de 1.63 A, en lugar del valor estándar de casi 21.63 A. Se puede decir que la corriente de arranque o pico se ve atenuada en un factor de 13 veces el valor nominal del controlador o conjunto de controladores conectados al ICL de bypass.

La tabla 5.5, presenta los parámetros de simulación de los luminarias obtenidos del sistema de arranque suave por bypass.

Tabla 5.5: Parámetros de simulación sistema de arranque suave por bypass.

Descripción	Bypass	Resistencia	Corriente irrupción [A]
Luminaria 1	sin byapass	-	21.6
Luminaria 2	con bypass	10 ohm	1.63

En la figura 5.15, se observa de color azul la corriente de arranque de la segunda luminaria LED el cual es menor que la señal de color rojo que es la corriente de la luminaria LED que no cuenta con el ICL.

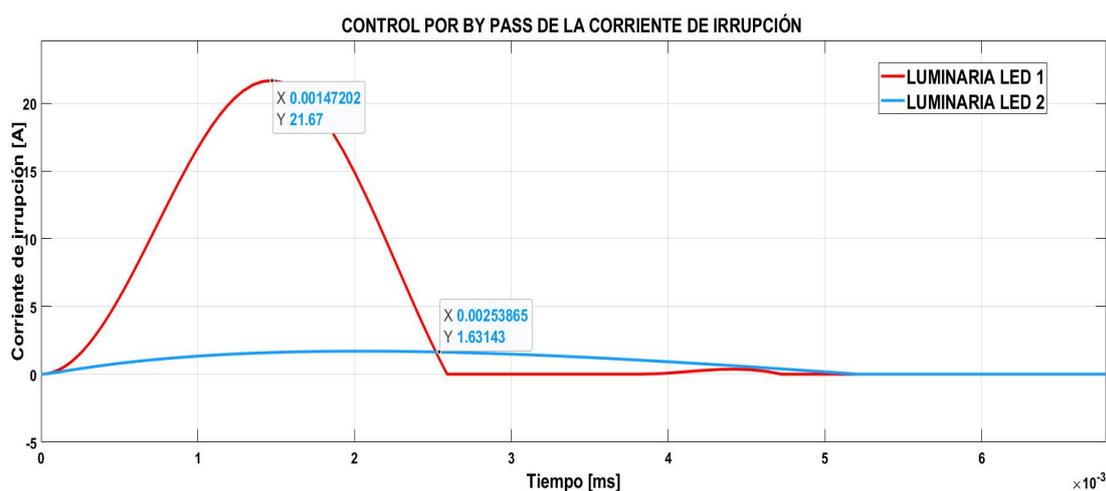


Figura 5.15: Control de la corriente de entrada por bypass.

Fuente: Autor

5.2.3. Arranque Suave por Regulador de Tensión

Un sistema limitador de corriente por variación de tensión es un método eficaz para reducir la corriente de irrupción, ya que al momento de ir subiendo la tensión de manera escalonada podemos controlar la amplitud de la tensión y corriente. Esta regulación de tensión no debe exceder la tensión máxima con la que trabaja la luminaria LED, caso contrario se quemará la luminaria.

La corriente de irrupción se da en el primer ciclo de onda la sinodal que corresponde al tiempo de 0 hasta 16.667 ms, es por ello que se analizó esta corriente, y una manera de reducirla es variando la tensión que va desde los 100 VAC (tensión mínima de operación)

hasta llegar a sus valores máximos de operación de 220 VAC, estos valores se los puede obtener en las hojas técnicas del fabricante.

Para lograr esta variación de tensión se cuenta con una fuente regulable de tensión donde se puede controlar la amplitud hasta lograr estabilizar el nivel de tensión indicado.

La tabla 5.6 muestra los parámetros de configuración de una fuente regulable, los valores de estos parámetros va acorde al ciclo de onda, tiempo y voltaje.

Tabla 5.6: Parámetros para la configuración de la fuente regulable de tensión

Fuente: Autor

Ciclo de onda	Tiempo (s)	Voltaje (V)
P1	0	100
P2	0.017	110
P3	0.033	120
P4	0.05	130
P5	0.067	140
P6	0.083	150
P7	0.1	160
P8	0.117	170
P9	0.133	180
P10	0.15	190
P11	0.167	200
P12	0.183	210
P13	0.2	220

Para la configuración de la parametrización de los datos en la fuente regulable se contó con tres parámetros importantes como: el tiempo, ciclo de onda y la tensión VAC de alimentación, al ajustar el nivel de tensión a los valores establecidos de la tabla 5.6 el voltaje de entrada AC se ira incrementando por cada ciclo de onda y este va en relación con el periodo de la onda senoidal.

La función de la configuración realizada permitirá que la fuente regulable se vaya incrementando 10 VAC en cada ciclo de onda hasta llegar a los 220 VAC, es decir, en doce ciclos la tensión debe llegar a la amplitud de 220 VAC hasta estabilizarse a sus valores nominales de operación, tal regulación se ve reflejada en la figura 5.16.

Esta variación se ve reflejada en la corriente de arranque, si la luminaria LED se enciende con la tensión mínima de funcionamiento (100 VAC), la corriente de irrupción no alcanzara sus valores máximos. Al energizar la luminaria LED de manera directa con el voltaje máximo de funcionamiento (220 VAC), la corriente de entrada puede llegar a valores relativamente altos.

En la figura 5.16, se determina que la configuración realizada cumple con las características de funcionamiento explicadas anteriormente.

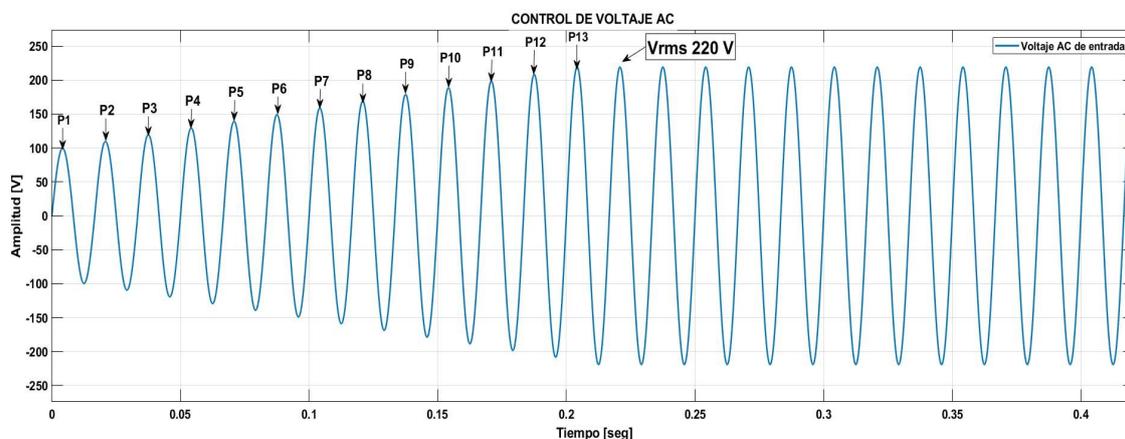


Figura 5.16: Control de voltaje AC de alimentación.
Fuente: Autor

En la figura 5.17, de color rojo se puede observar la corriente de irrupción de la luminaria que fue alimentada de manera directa con un voltaje 220 VAC y tiene una de corriente irrupción de 21.6 A, mientras que la señal de color azul es la de corriente pico de la luminaria que cuenta con un control de tensión regulable que alcanza un valor de corriente de 9.81 A

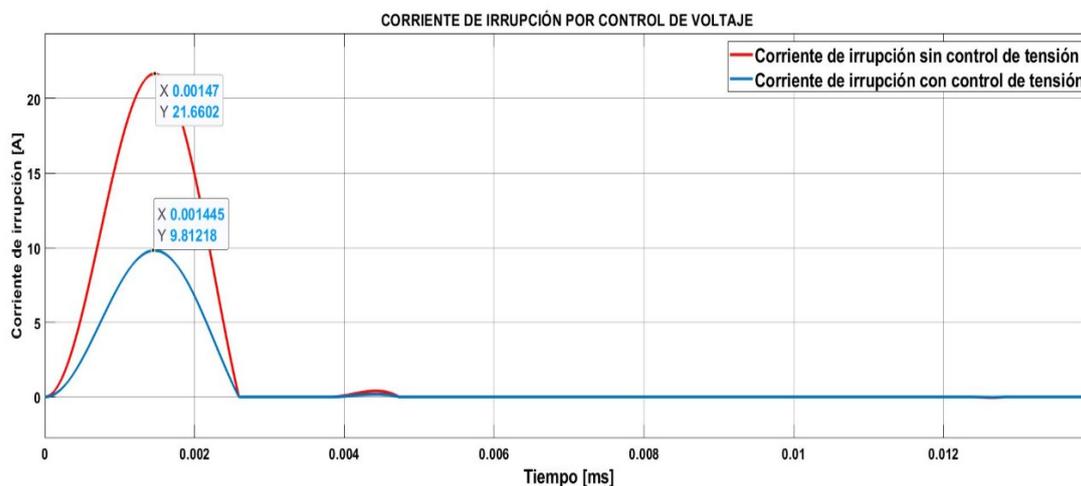


Figura 5.17: Control de la corriente de irrupción por la regulación de voltaje.
Fuente: Autor

Es importante recalcar que la corriente de 9.81 A, se da en el primero ciclo de onda, esta regulación de tensión tiene 12 de ciclo en total, en cada ciclo hay una corriente de pico, pero estas corrientes no se suman debido a que se dan en diferentes ciclos de onda y no en un solo ciclo.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Las luminarias LED de alta potencia en la actualidad están ganando mercado en el sector de la iluminación y han tenido un crecimiento exponencial durante los últimos años, gracias a su renovada tecnología y ahorro energético están reemplazando a la iluminación tradicional.

De igual manera con el crecimiento exponencial de las luminarias LED de alta potencia que utilizan fuentes de alimentación conmutadas, existe una necesidad constante de elegir la técnica adecuada de limitación de la corriente de irrupción en una aplicación concreta. Debido a los grandes condensadores utilizados en las fuentes conmutadas existen grandes corrientes de entrada durante el arranque de un dispositivo, independientemente del tipo de fuente conmutada que las luminarias LED utilicen, existirán corrientes picos en el momento del encendido.

El problema de los picos de corriente de arranque es muy común en la gran mayoría de controladores LED, algunos fabricantes ya están incorporando mecanismos activos o pasivos para limitar el pico de corriente de arranque.

Las propuestas de los sistemas de arranque suave ayudarán evitar las falsas activaciones de las protecciones y a reducir el envejecimiento de los controladores LED ante las corrientes pico de entrada. Estas propuestas se pueden aplicar individualmente o hacer combinaciones entre ellas proporcionando así una protección mejorada a las líneas que alimentan a las luminarias LED.

Los arranques suaves propuestos para luminarias LED de alta potencia están basados en limitadores de corriente de tipo activo ya que es la forma más práctica de controlar la corriente de irrupción en un circuito de iluminación LED, se puede concluir que:

El sistema de arranque por temporización simultánea permitirá reducir la corriente de irrupción inicial de una o más luminarias conectadas a un solo circuito, este tipo de

control se lo puede realizar mediante dispositivos que permitan controlar el encendido de las luminarias.

- El arranque suave por temporización simultánea permitirá tener un encendido secuencial de las luminarias LED que estén conectadas al circuito de iluminación, este concepto de control de la corriente de irrupción se puede realizar tanto por dispositivos de control externos a las luminarias o por control programable interno.
- Este tipo de control es más eficiente en luminarias de encendido directo, puesto que, este tipo de luminarias no cuentan con algún tipo de control programable interno que permitan controlar el momento del encendido de la luminaria.

A través del control por temporización simultánea se propuso un sistema de arranque suave por control de bypass, el cual consiste en utilizar un relay de retardo y una resistencia en paralelo al contactor de paso.

- El sistema de control por bypass utilizado para minimizar la corriente de irrupción presentó una respuesta más eficiente al momento de limitar corriente de arranque ya que inicialmente la corriente de encendido pasa a través de la resistencia y se desconecta después lapso mínimo de tiempo, logrando así disminuir hasta 10 veces la corriente de irrupción inicial, de igual manera este tipo de control por ICL es de tipo activo.

La propuesta del regulador de tensión se puede aplicar de manera externa a la luminaria LED o de manera interna a luminarias que cuenten con un sistema de control de voltaje. Esta propuesta de sistema de arranque suave en base al control de voltaje, permitirá regular el voltaje inicial de encendido, logrando así minimizar un 55 % la corriente de irrupción a diferencia de la que no disponga este regulador.

- La luminaria LED que cuente con este sistema de regulación de tensión tendrá una corriente de irrupción baja hasta el 55 % menos, ya que la amplitud de la corriente de irrupción depende en gran medida del nivel de voltaje de entrada y se presenta en el primer ciclo de trabajo.
- Es importante mencionar que la luminaria que no disponga de este controlador, su amplitud de corriente de irrupción podrá llegar a valores de hasta 100 veces su corriente nominal.

Se han demostrado a través de comparativas entre los resultados experimentales y de simulación que los sistemas de arranque suave propuestos tienen una viabilidad positiva reduciendo más del 50 % la corriente de irrupción de las luminarias LED.

6.2. Recomendaciones

Una posible solución consiste en cambiar la curva de disparo mediante la colocación de elementos de protección más lentos. Sin embargo, esta medida no sería eficiente en el caso de necesitar una intervención rápida de protección ante una falla propia del circuito o externa por la red, pues la selección de una protección más lenta sin un estudio previo va asociada a efectos colaterales como accidentes eléctricos de alto riesgo. Una mejor alternativa es utilizar los llamados limitadores de corriente de arranque ICL, que protegen las sobre-corrientes en el momento del arranque o encendido.

Dentro de los sistemas de iluminación, es importante tener en cuenta la cantidad de luminarias conectadas en el mismo circuito ya que el dimensionamiento de la protección va en función de: la corriente de irrupción, la potencia y de la cantidad de luminarias. Es fundamental realizar la coordinación de protecciones para seleccionar la protección adecuada, para evitar problemas futuros dentro del cuadro de cargas por corrientes de irrupción.

Hay que tener en consideración al momento de realizar un circuito de iluminación LED la corriente de irrupción tanto de las luminarias LED como de las fuentes de alimentación que se utilizan para alimentar a las mismas. Esta información se la puede encontrar en las hojas técnicas de las luminarias o fuentes LED y en caso de no tener dicha información es importante solicitar la información al fabricante.

Para evitar la compra de dispositivos limitadores de corriente es recomendable dividir la cantidad de luminarias en varios circuitos, para evitar que se produzca una corriente de irrupción inicial demasiado alta. Su encendido debe realizarse a través de temporizadores para que las luminarias tengan una mínima diferencia de tiempo con respecto a las demás, evitando así que todas las luminarias se enciendan en el mismo lapso de tiempo.

Anexo A

Diagrama Unifilar de los Circuitos de Iluminación de las Cúpulas de la Catedral de Cuenca

Glosario

- A Amperio.
- AC Corriente Alterna.
- ARCONEL Agencia de Regulación y Control de Electricidad - Entidad reguladora y de monitoreo para la operación y desarrollo del sector eléctrico en Ecuador.
- BT Baja tensión.
- DC Corriente Continua.
- hrs Horas.
- Hz Hertz (Ciclo por segundo).
- ICL Inrush Current Limiter (Limitador de corriente de irrupción).
- IEC International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional).
- IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
- IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolar de puerta aislada).
- In Corriente nominal.
- IP Degrees of Protection (Grado de Protección).
- LED Lighting Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz).
- MCB Miniature Circuit Breaker (Disyuntor en miniatura).
- ms Milisegundos.
- NTC Negative Temperature Coefficient (Coeficiente de temperatura negativo).
- PCB Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso).
- PLC Programmable Logic Controller (Controlador lógico programable).
- PTC Positive Temperature Coefficient (Coeficiente de temperatura positivo).
- PWM Pulse-Width Modulation (Modulación por ancho de pulso).

RCBO Residual Current Breaker with Over-Current (Interruptor de corriente residual con protección contra sobrecargas).

rms Voltaje eficaz.

SMD Surface mounted device (Dispositivo de montaje superficial).

SSR Solid State Relay (Relé de estado sólido).

THD Total Harmonic Distortion (Distorsión armónica total).

UPS Universidad Politécnica Salesiana.

W Potencia activa.

Z Impedancia.

Bibliografía

- [1] S.-H. Lin, M.-T. Chen, and D.-J. Lin, “Implementation of high power led driving source with high efficiency and high power factor for indoor illumination,” in *2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*. IEEE, 2018, pp. 105–108.
- [2] R. P. Medeiros, K. R. Albuquerque, J. C. O. Custódio, C. M. Padilha, J. M. Villanueva, E. C. Macedo, L. V. Hartmann, and J. J. Moura, “Reduction of inrush current on load actuator stage,” in *2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [3] V. Čuk, J. F. Cobben, and W. L. Kling, “Inrush related problems caused by lamps with electronic drivers and their mitigation,” in *Recent Reseaches in System Science, Proceedings of the 15th WSEAS International Conference in Systems, Corfu Island, Greece*, 2011, pp. 321–326.
- [4] M. Hermoso-Orzáez, J. Rojas-Sola, and A. Gago-Calderón, “Electrical consequences of large-scale replacement of metal halide by LED luminaires,” *Lighting Research & Technology*, vol. 50, no. 2, pp. 282–293, Apr. 2018. [Online]. Available: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1477153516645647>
- [5] A. S. Calero Calero and K. B. Correa Asimbaya, “Estudio de viabilidad para el ahorro energético y mejora del consumo eléctrico de la fábrica orangine durante el año 2015.” B.S. thesis, 2016.
- [6] S. López Arias, “Iluminación y alumbrado público,” *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, 2015.
- [7] J. H. Delgado, “Optimización de la extracción de fotones en fósforos remotos para luminarias led de alta potencia,” *maestría en ciencias (óptica)*, *Centro de Investigaciones en Optica AC, Leon, Guanajuato, México*, vol. 2, p. 19, 2017.
- [8] E. D. Chasipanta Chuquimarca, “Diseño e implementación de un prototipo electro-óptico para controlar un diodo emisor de luz (led) de alta potencia,” B.S. thesis, Quito, 2020., 2020.

- [9] K. Delendik, N. Kolyago, and O. Voitik, “Design and investigation of cooling system for high-power led luminaire,” *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 83, pp. 84–94, 2021.
- [10] J. Askola, H. Baumgartner, T. Pulli, P. Kärhä, and E. Ikonen, “Influence of smart lighting control on the lifetime of high power led luminaires,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 352, no. 1. IOP Publishing, 2019, p. 012043.
- [11] B.-J. Huang, P.-C. Hsu, M.-S. Wu, and C.-W. Tang, “Study of system dynamics model and control of a high-power led lighting luminaire,” *Energy*, vol. 32, no. 11, pp. 2187–2198, 2007.
- [12] J. L. F. Barbosa, W. P. Calixto, and D. Simon, “High power led luminaire design optimization,” in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2016, pp. 1–6.
- [13] J. L. F. Barbosa, D. Simon, and W. P. Calixto, “Design optimization of a high power led matrix luminaire,” *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/639>
- [14] E. Mateu Salinas, “Fiabilidad de sistemas de iluminación vial y urbana basados en diodos led,” Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2016.
- [15] Philips, “Luminarias para exterior, catálogo 2017.” 2017. [Online]. Available: http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Colombia/ODLI20170731.001-UPD-es_CO-Catalogo_Alumbrado_Exterior_NL.2017.pdf
- [16] B. Uherek-Bradecka, “Linear lighting in architectural interior and exterior design: Current trend or a future?” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 603, no. 2. IOP Publishing, 2019, p. 022061.
- [17] E. Serea and D. D. Lucache, “Consequences of inappropriate use of architectural lighting,” in *2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, 2020, pp. 016–021.
- [18] I. Bayneva, “Led light computer simulation and design on solar battery,” *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, vol. 7, no. 4.36, pp. 910–913, 2018.
- [19] A. López and R. Andrés, “Análisis de las pérdidas de potencia y energía en las lámparas y sus componentes y determinación del tiempo de funcionamiento del sistema de alumbrado público,” Ph.D. dissertation, Apr. 2020, accepted: 2020-04-17T22:20:52Z Publisher: Quito, 2020. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20811>

- [20] R. S. Llano Orbenes, “Diseño y construcción de fuentes DC autónoma para alimentación de circuitos de electrónica de potencia,” Ph.D. dissertation, Universidad Técnica Federico San Sebastián, Valparaíso-Chile, 2016.
- [21] G. Lozoya Martínez, “Desarrollo de una fuente conmutada fuera de línea,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2018. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/15535/Tesis.pdf?sequence=3>
- [22] C. I. Obrist Tagle, “Fuentes conmutadas y estudio de fuente ATX,” Thesis, Valparaíso-Chile, Aug. 2018.
- [23] P. L. Vernaza Cheberre, “Diseño y construcción de una fuente de corriente constante con salida múltiple (dc).” Ph.D. dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de . . . , 2017.
- [24] J. A. Castro Wilches and G. A. Henao Peñaranda, “Diseño e Implementación de un Driver para Bombillas Domiciliarias Led con Corrector de Factor de Potencia y Disminución de THD,” Tesis, Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia, 2016, accepted: 2016-09-23T20:12:29Z. [Online]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3648>
- [25] J. L. Grande Ruiz de la Torre, “Iluminación con LEDs,” Thesis, Universidad Zaragoza, Zaragoza-España, 2015.
- [26] M. del Mar Lopez, “Diseño de un panel de LEDs,” Ph.D. dissertation, Catalunya, Catalunya-España, 2015. [Online]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40401/4/mariamargonTFC0115memoria.pdf>
- [27] P. Markiewicz, R. Sikora, and W. Pabjanczyk, “Statistical analysis of peak inrush current: a case study,” *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2018.
- [28] F. Liu, Z. Tao, and X. Zhang, “The application research of soft starting technology in marine led lighting system,” in *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. IEEE, 2019, pp. 2105–2110.
- [29] F. E. Sinaga, S. I. Ibad, D. H. Rusman, A. H. Salman, and M. I. Arsyad, “Eliminating accumulation of inrush current with sequential method,” in *2019 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [30] A. V. Abramov, A. A. Bogdanov, A. V. Danilko, P. B. Dmitriev, A. V. Karev, and A. V. Stepanov, “Inrush current measurement methodology of led lighting fixtures.” *Light & Engineering*, vol. 29, no. 1, 2021.

- [31] A. Kaknevicus and A. Hoover, “Managing Inrush Current,” 2015. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/slva670a/slva670a.pdf?ts=1634705645404&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [32] eldoLED, “How to choose the right circuit break,” 2016. [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/25257827/learning-center-application-note-how-to-choose-the-right-...>
- [33] P. Barrantes, “Corriente de arranque LED y disparos del magnetotérmico,” Nov. 2020. [Online]. Available: <https://fesiluz.com/corriente-de-arranque-led-y-disparos-del-magnetotermico>
- [34] J. L. Cango Cango, “Diseño de un manual de prácticas para el laboratorio de calidad de energía en la universidad politécnica salesiana sede cuenca,” B.S. thesis, 2020.
- [35] A. Amaguaya and W. Alcívar, “Estudio y análisis de la calidad de la energía eléctrica de un banco de transformadores en media tensión a la empresa Hidalgo & Hidalgo en la ciudad de Guayaquil.” Mar. 2019, accepted: 2019-04-11T18:30:08Z Publisher: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. [Online]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12522>
- [36] B. Aguirre, I. E, Bobino, C. E, and J. M, “Análisis de perturbaciones en redes eléctricas, causas y consecuencias en sistemas de control industrial,” Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, Tech. Rep. 11, 2019. [Online]. Available: <http://rumbostecnologicos.utnfrainvestigacionyposgrado.com/wp-content/uploads/2019/11/R11-AR3.pdf>
- [37] M. Bollen, A. G. de Castro, and S. Rönnberg, “Characterization methods and typical levels of variations in rms voltage at the time scale between 1 second and 10 minutes,” *Electric Power Systems Research*, vol. 184, p. 106322, 2020.
- [38] P. Logger, “Manual de Uso 1735 Power Logger,” vol. 10, no. March 2006, 2010. [Online]. Available: <https://usermanual.wiki/Fluke/Fluke1735UsersManual809309.1531249856/view>
- [39] BEAMA, BSI, CEI, and LIA, “Guide to circuit-breaker selection for led lighting.” Mar. 2021. [Online]. Available: <https://www.beama.org.uk/resourceLibrary/beama-guide-to-circuit-breaker-selection-for-led-lighting-.html>
- [40] D. Bogdanov, “Protection of lines supplying led luminaries,” in *2018 Seventh Balkan Conference on Lighting (BalkanLight)*, 2018, pp. 1–4.

- [41] C. Espinoza, F. Villavicencio, O. Cuzco, J. Aguilar, E. Ayala, and J. Morales, "Time response laboratory analysis for residual current devices," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 2017, pp. 1–6.
- [42] S. Electric and S. O. Line, "Manual y Catálogo SHCNEIDER," *Control*, pp. 0–3, 1982. [Online]. Available: https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6747/mod_resource/content/1/MANUALCOMPLETOSHCNEIDER.pdf
- [43] E. Manousaka, "Dc-dc buck converter with inrush current limiter," 2013.
- [44] E. Piano and C. Kofod, "Iluminación LED para interiores en el sector de servicios públicos y privados," Oct. 2018. [Online]. Available: https://www.ecoserveis.net/wp-content/uploads/2019/02/Guia_Iluminacion_Interior_web.pdf
- [45] B. Iuga and R. A. Tirnovan, "Step by step limiting for capacitors inrush current used in voltage power supplies," in *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, 2019, pp. 1–4.
- [46] E.-J. Lee, J.-H. Ahn, S.-M. Shin, and B.-K. Lee, "Comparative analysis of active inrush current limiter for high-voltage dc power supply system," in *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2012, pp. 1256–1260.
- [47] K. Martín, P. F. Miaja, D. G. Lamar, J. Sebastián, and S. Álvarez, "Implementación de un Sistema de Standby en un Elevador con Corrección del Factor de Potencia," p. 6.
- [48] T. Jiang, P. Cairolì, R. Rodrigues, and Y. Du, "Inrush current limiting for solid state devices using ntc resistor," in *SoutheastCon 2017*, 2017, pp. 1–7.
- [49] Cédric Reymond, Sébastien Jacques, Ghafour Benabdelaziz, and Jean-Charles Lebonetel, "An Active Inrush Current Limiter Based on SCR Phase Shift Control for EV Charging Systems," *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 10, no. 4, Apr. 2016. [Online]. Available: <http://www.davidpublisher.com/index.php/Home/Article/index?id=25641.html>
- [50] H. Bălan, L. Neamț, M. I. Buzdugan, T. Varodi, and E. Pop, "Fault current limiter with solid-state circuit breakers," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 144, p. 012001, Aug. 2016. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/144/1/012001>
- [51] D. Rand, B. Lehman, and A. Shteynberg, "Issues, Models and Solutions for Triac Modulated Phase Dimming of LED Lamps," in *2007 IEEE Power Electronics*

- Specialists Conference*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007, pp. 1398–1404. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4342199/>
- [52] Y. Patel, B. Panchal, S. Parmar, K. Shinde, and P. Prajapati, “Power factor correction with microcontroller use solid state relay,” *Journal for Research— Volume*, vol. 5, no. 2, 2019.
- [53] M. J. H. Orzáez and A. G. Calderón, “Example of Technical Specification of Administrative Clauses for the projects of massive change to leds tendered from the Local Administration.” p. 17, 2017.
- [54] H.-A. Ahn, S.-K. Hong, and O.-K. Kwon, “A fast switching current regulator using slewing time reduction method for high dimming ratio of led backlight drivers,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 63, no. 11, pp. 1014–1018, 2016.
- [55] Y.-C. Huang and H.-W. Chen, “A novel fast-switching current-pulse driver for led backlight applications,” in *2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, 2016, pp. 1–2.
- [56] S. Electric, “Lighting Technical Guide,” p. 112.
- [57] F. E. Manrique Latorre, D. E. Sosa Mora *et al.*, “Análisis y diseño de los conversores dc/dc básicos: el reductor, el elevador y el reductor-elevador. consideraciones de tensión, corriente y potencia de cada elemento que compone el circuito,” 2018.
- [58] J. P. AGUAYO ARANEDA and A. A. MELLA BRANTT, “Simulaciones de fallas para variadores de frecuencia en baja tension,” 2018.
- [59] F. E. L. Monteagudo, C. A. O. Olvera, M. A. A. Esquivel, C. G. Martínez, M. V. Llanes, A. M. M. Bañuelos, D. J. G. Meléndez, and A. L. Martínez, “Fuel cells with lifting converters for alternative energies,” *Ingeniería Energética*, vol. 40, no. 1, pp. 3–13, 2019.
- [60] J. Afonso Rodríguez, “Estudio teórico de sistemas de control en un elevador de tensión con relación de transformación elevada,” B.S. thesis, 2014.
- [61] N. Blanco Perdomo, “Tecnicas de control en sistemas no lineales. aplicacion en un elevador de tension 115 a 230 v.” 2013.
- [62] N. Gómez Tejera *et al.*, “Diseño e implementación de un inversor variador dc-ac,” 2017.
- [63] P. Abellán Olivares, “Diseño de una gui en matlab para el estudio y control de variadores de frecuencia en motores eléctricos,” 2021.

- [64] V. Kalenteridis, Z. Agorastou, and S. Siskos, “A soft start-up technique for inrush current limitation in dc-dc converters,” in *2019 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [65] F. Bento and A. J. Marques Cardoso, “Fault-tolerant led lighting systems featuring minimal loss of luminous flux,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 4309–4318, 2020.
- [66] Philips, “Catálogo de iluminación profesional,” no. 1, pp. 1–858, 2021. [Online]. Available: <https://www.assets.signify.com/is/content/Signify/Assets/philips-lighting/spain/20211021-lighting-tariff-catalog-2021-lr-es.pdf>
- [67] Griven, “Griven 2020 collection,” no. 1, pp. 1 – 228, 2020. [Online]. Available: <https://www.griven.com/en/downloads>
- [68] M. F. Braga, F. J. Nogueira, M. F. Campos, L. H. Gouveia, and H. A. Braga, “A comparative study regarding linear fluorescent and led lamps for indoor lighting,” in *2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*. IEEE, 2014, pp. 1–7.
- [69] N. Das, N. Pal, and S. K. Pradip, “Economic cost analysis of led over hps flood lights for an efficient exterior lighting design using solar pv,” *Building and Environment*, vol. 89, pp. 380–392, 2015.
- [70] Griven, “SOLUTIONS POWERSHINE MK2 D,” 2016, pp. 1–17.
- [71] A. F. Barbosa Franco, L. A. Noguera Vega, and W. M. Giral Ramírez, “Análisis de distorsión armónica en iluminación LED,” *Revista vínculos*, vol. 14, no. 2, pp. 95–107, Dec. 2017. [Online]. Available: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/vinculos/article/view/12520>
- [72] C. Sur and F. Iluminar, “Calidad de producto Informe de monitoreo de la Iglesia Catedral,” Centro Sur, Ecuador, Azuay-Cuenca, Tecnico, 2020.
- [73] Agencia de Regulación y Control de Electricidad - Arconel, “Regulacion No. ARCONEL-005-2018.pdf,” p. 38, 2019. [Online]. Available: <https://vlex.ec/vid/arconel-005-18-expidese-766576301>
- [74] M. Kadota, H. Shoji, H. Hirose, A. Hatakeyama, and K. Wada, “A turn-off delay controlled bleeder circuit for single-stage triac dimmable led driver with small-scale implementation and low output current ripple,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 10, pp. 10 069–10 081, 2019.