

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

NADA HUMANO ME ES AJENO

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS

ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

**Diseño e implementación de una fuente conmutada “DRIVER”
para iluminación con leds blancos y atenuación a dos hilos**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

LICENCIADOS EN INGENIERÍA EN SISTEMAS

ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTAN

JAVIER AMBROSIO ALMIRAYA

DAVID CASTILLO RAMÍREZ

DIRECTOR

ING. DAVID VELÁZQUEZ SUÁREZ

Ciudad de México, mayo de 2026.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

INTEGRACIÓN DEL JURADO:

Presidente:

Ingeniero David Velázquez Suárez, UNAM.

Secretario:

Ingeniero Manuel Alberto Soriano Avila, UNAM.

Vocal:

Maestría en Ingeniería Christian Agustín Vázquez Villanueva, UNAM.

Institución donde se realizó el examen de titulación:

Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Plantel:

San Lorenzo Tezonco.

DIRECTOR DEL TRABAJO RECEPCIONAL

ING. DAVID VELÁZQUEZ SUÁREZ

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS.

A mi madre Concepción Castillo Ramirez, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad, principios que han guiado cada paso de mi formación personal y profesional. Este logro también es tuyo.

A mi familia, quienes con su comprensión, motivación y apoyo incondicional me han acompañado a lo largo de este camino académico. Sus palabras de aliento y confianza han sido una fuente constante de inspiración para seguir adelante y superar los desafíos que se han presentado.

A mis profesores, quienes a lo largo de mi formación académica compartieron sus conocimientos, experiencia y orientación. Su dedicación y compromiso con la enseñanza han contribuido significativamente a mi desarrollo académico, profesional y humano.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera han formado parte de este proceso, brindando apoyo, consejos y motivación para alcanzar esta meta.

Finalmente, agradezco a la UACM que me brindó la oportunidad de formarme como profesionista, así como a cada una de las experiencias que contribuyeron a mi crecimiento académico, social y profesional.

DAVID CASTILLO RAMIREZ.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres, Norma Gabriela Almiraya Carbajal y Javier Ambrosio Ortega, por su constante apoyo a lo largo de cada etapa de mi vida. Su ejemplo de dedicación, trabajo y perseverancia ha sido una fuente permanente de inspiración y el fundamento que ha hecho posible la culminación de este logro.

De manera especial, reconozco con gratitud a mis abuelos, Ana María Carvajal Ramírez y Gabriel Almiraya Medina, por sus enseñanzas, valores y el cariño brindado a lo largo de mi vida, los cuales han contribuido de manera significativa a mi formación personal y humana.

A mi hija Ileana A. Domínguez, quien representa una de las mayores motivaciones en mi vida. Su presencia ha sido una fuente permanente de inspiración para seguir adelante, superarme y esforzarme cada día por construir un mejor futuro para ella.

A mis profesores, quienes a lo largo de mi formación académica compartieron generosamente sus conocimientos, experiencia y orientación. Su compromiso con la enseñanza y su vocación formativa contribuyeron de manera significativa a mi desarrollo académico, profesional y humano.

Asimismo, extiendo mi reconocimiento a todas aquellas personas que, directa o indirectamente, aportaron apoyo, consejos y motivación durante este camino, haciendo posible la culminación de esta etapa académica.

Finalmente, agradezco a la UACM, que me brindó la oportunidad de formarme profesionalmente y de desarrollar las capacidades que hoy me permiten concluir este trabajo.

Con sincero reconocimiento y gratitud.

JAVIER AMBROSIO ALMIRAYA.

El diseño en ingeniería se ha convertido en una prioridad para el ser humano, al constituir el proceso de aplicar diversas técnicas y principios científicos con el propósito de mejorar, optimizar y facilitar las actividades cotidianas.

El diseño puede ser simple o muy complejo, fácil o difícil, matemático o no matemático; puede implicar un problema trivial o uno de gran importancia. Sin embargo, bajo ninguna circunstancia debe perderse de vista el compromiso con el entorno y la responsabilidad ambiental.

Ingeniería es encontrar una solución donde no hay solución.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	13
CAPITULO I.....	15
Luz, iluminación, conceptos generales.....	15
1.1 Breve historia de la luz	16
1.2 Aspectos generales sobre luz natural y luz artificial	17
1.3 Teorías de la luz.....	17
1.4 Definiciones.....	19
1.4.1 Cantidad de luz (lumen)	19
1.4.2 Intensidad luminosa (candela)	20
1.4.3 Cantidad de iluminación o iluminancia (lux)	20
1.4.4 Temperatura de color [°K]	21
1.4.5 Rendimiento de color [IRC]	22
CAPITULO II	23
La tecnología de luz con diodos emisores (LEDs).....	23
2.1 La tecnología de luz con diodos emisores	24
2.2 Mecanismos para producir luz blanca con LEDs	24
2.2.1 Combinación de LEDs.....	24
2.2.2 Conversión por fosforización	25
2.3 Principios de funcionamiento del LED, el semiconductor	25
2.4 El sistema integrado entre semiconductor y encapsulado del LED.....	26
2.5 LED de luz blanca	26
2.6 El sistema de color CIE (Comisión Internacional de Iluminación).....	27
CAPÍTULO III	29
Control de LEDs. Voltaje o Corriente.	29
3.1 El diodo, principio de funcionamiento	30
3.2 Tipos de diodos para luz artificial	32
3.3 Ejemplos de diodos emisores de luz blanca, curvas de polarización y funcionamiento.	32
3.4 Led COB del fabricante Bridgelux.....	33
3.5 Modelo Matemático de LED Bridgelux COB.....	36
CAPÍTULO IV	38
Controladores inteligentes para iluminación con LEDs (DRIVERS).	38
4.1 Antecedentes. Fuentes conmutadas y sus tipos.	39
4.1.1 Convertidor Buck (reductor)	40
4.1.2 Convertidor Boost (elevador)	40

4.1.3 Convertidor Buck-Boost (Elevador-Reductor).....	41
4.1.4 Convertidor SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter)	41
4.1.5 Convertidor Flyback.	41
4.1.6 Funcionamiento del Convertidor Flyback.	42
4.1.6.1 Primera etapa.	43
4.1.6.2 Segunda etapa.	44
4.2 Modos de funcionamiento de las fuentes conmutadas, CCM, DCM, BCM	46
4.3 Modo de Conducción Continua (CCM – Continuous Conduction Mode).	47
4.4 Modo de Conducción Discontinua (DCM – Discontinuous Conduction Mode).	48
4.5 Modo de Conducción en el Límite (BCM – Boundary Conduction Mode).	48
4.6 Las fuentes conmutadas y el factor de potencia.	49
4.7 Fabricantes de drivers para LEDs. Algunos ejemplos.....	49
4.8 Selección del driver a implementar.	52
CAPITULO V	53
Implementación del controlador DLA2H.....	53
5.1 Especificaciones del driver.....	54
5.1.1 FL7734 y la Normatividad para productos de Iluminación.....	54
5.1.2 Soluciones para sistemas de Iluminación con atenuación, tipos.	54
5.1.2.1 Atenuación por corte de fase (Phase-Cut Dimming).....	55
5.1.2.2 Atenuación por señal analógica (0–10 V / 1–10 V)	55
5.1.2.3 Atenuación por modulación por ancho de pulso (PWM).....	56
5.1.2.4 Atenuación digital mediante protocolo DALI (Digital Addressable Lighting Interface).....	56
5.1.2.5 Sistemas inalámbricos de atenuación	57
5.1.2.6 Atenuación por control a dos hilos (Two-Wire Dimming)	57
5.1.3 El FL7734 tipos de atenuaciones y características generales.	58
5.1.4 FL7734 Especificaciones Técnicas generales	58
5.1.4.1 Características técnicas de sistemas internos.....	59
5.1.5 Descripción funcional del sistema implementado en el FL7734.....	63
5.1.6 Procedimiento de encendido.....	63
5.1.7 Regulación de corriente constante	65
5.1.8 Control de corriente de entrada constante	65
5.1.9 Control de atenuación (dimming).....	65
5.1.10 Factor de Potencia (PF) y distorsión de armónicas (THD)	67
5.1.11 Control de frecuencia lineal.....	68
5.1.12 Control para modo de funcionamiento en la frontera de conducción (BCM)	69
5.1.13 Protección contra cortocircuito en LEDs	69

5.1.14 Protección de LEDs abiertos.	70
5.1.15 Protección contra cortocircuito de la resistencia de sensor RS.	70
5.1.16 Bloqueo o protección por bajo voltaje de la polarización VDD, (UVLO).....	71
5.1.17 Protección contra sobretemperatura (OTP)	71
5.2 Diagrama de Flujo de Diseño.	72
5.3 Diseño utilizando la Hoja de Cálculo.	90
5.3 Diseño Propuesto, especificaciones de componentes.....	92
5.1.7 Diseño Propuesto, especificaciones (Voltaje de LED 29v, Corriente de LED 1050 mA).....	94
5.2 Resumen de valores de Componentes del diseño del FL7734	95
5.3 Diseño del Transformador.	96
.....	96
5.3.1 Pasos de procedimiento de Diseño	97
5.3.2 Transformador Propuesto	99
5.4 Diseño de circuito impreso	104
5.4.1 Diagrama Esquemático, ver Figura 5.48	104
5.4.2 Diseño de Circuito PCB.	105
5.5 Pruebas y resultados	106
5.5.1 Pruebas y resultados.	108
5.5.1.1 Condiciones de entrada sin atenuador (Dimmer)	108
Secuencia de arranque a 120V de entrada	108
5.5.1.2 Condiciones de salida sin atenuador.....	112
5.5.1.3 Condiciones de entrada y salida con atenuador.....	113
5.6 El driver DLA2H, muestra final.	115
CONCLUSIONES.....	117
ÍNDICE DE FIGURAS	118
BIBLIOGRAFÍA.....	121

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar una fuente de potencia controlada para sistemas de iluminación con LEDS [¹], para diferentes usos; doméstico, comercial, oficina, entre otros; utilizando un circuito integrado de aplicación específica, el controlador FL7734 [²], debe cumplir con la normatividad para estos sistemas y con dispositivos electrónicos de control de reciente desarrollo; la fuente denominada como DLA2H será capaz de controlar la potencia hacia los LEDS con atenuadores comerciales en la red eléctrica (Dimmer [³]).

OBJETIVO PARTICULARES

Hacer un resumen histórico del desarrollo de las formas de generación de luz artificial.

Hacer un resumen de los conceptos generales sobre que es la luz, iluminación, cualidades y parámetros de la iluminación artificial.

Investigar y documentar sobre los nuevos desarrollos tecnológicos para generar luz en el espectro visible con LEDS blancos, sus cualidades, eficiencia y calidad.

Investigar y documentar sobre las técnicas de control de la operación de los diodos LEDS de luz blanca.

Investigar y documentar sobre las Fuentes conmutadas en la electrónica de potencia.

Documentar sobre los dispositivos de control (drivers) para Fuentes luminosas con LEDS, realizar un resumen de los fabricantes principales y algunos de sus desarrollos.

Seleccionar un dispositivo de control de Fuentes luminosas para LEDS con la función de atenuación, documentar sus principios de funcionamiento y procedimientos para diseñar una aplicación.

Definir y proponer una aplicación, diseñar e implementar la fuente propuesta.

Documentar y aplicar las técnicas de diseño de transformadores para operación en altas frecuencias.

1 LED. Light Emitter Diode. Diodo Emisor de Luz

2 FL7734. Dispositivo controlador de una sola etapa por PWM para LEDS, atenuable a dos hilos de la empresa ONSEMI

3 Dimmer: dispositivo que reemplaza un interruptor convencional y permite ajustar gradualmente la intensidad de la luz, desde muy tenue hasta máxima, para crear ambientes, ahorrar energía y adaptar la iluminación a cada necesidad, funcionando con sistemas convencionales y LED.

INTRODUCCIÓN

La luz es una forma de energía electromagnética que se percibe visualmente a través del sistema ocular. Se produce mediante diversos procesos, como la excitación de átomos y tiene características esenciales como intensidad, color y distribución espacial.

La iluminación, por otro lado, se refiere al uso de fuentes de luz artificial para proporcionar visibilidad y contribuir a la atmósfera o ambiente de un entorno. Los parámetros que determinan la iluminación incluyen la *cantidad de luz* medida en lúmenes, la *intensidad luminosa* en candelas, el *nivel de iluminación* en lux, la *temperatura de color* que describe la percepción del color de la luz emitida, medida correlacionada a grados Kelvin; además la iluminación con luz artificial considera otro parámetro definido como *Índice de Reproducción Cromática*, el cual indica que tan fielmente vemos los colores de los objetos iluminados por la fuente de luz artificial.

Los LEDs se destacan actualmente por su alta eficiencia en la conversión de energía eléctrica en luz visible, con eficiencias de 200 lm/W, comparados con la eficiencia de lámparas incandescentes de 25 lm/W y generando menor emisión de calor en comparación con otras fuentes de iluminación tradicionales.

El desarrollo de la tecnología de iluminación LED ha sido significativo a lo largo de las décadas. Desde la invención de los primeros LEDs en la década de 1960, los avances tecnológicos han permitido la creación de LEDs capaces de emitir luz en todo el espectro visible, desde el rojo hasta el azul. Este progreso comenzó a ser comercialmente viable en la década de los 90 con la mejora de los materiales semiconductores, como el nitruro de galio (GaN), que permitió la creación de LEDs más eficientes y con mejor rendimiento en términos de durabilidad y calidad del color. El uso de LEDs para generar luz blanca con la eficiencia y calidad de reproducción cromática se logró mediante la combinación de fósforos con LEDs azules; inicialmente se combinaba la emisión de leds de tres colores diferentes para lograr el blanco, sistema de baja eficiencia y baja reproducción cromática. Lograr LEDs de frecuencias de emisión que exciten los fotones del fosforo ha dado lugar a una iluminación más eficiente y con una vida útil mayor que las fuentes de luz tradicionales.

Por otro lado, los LEDs modernos utilizan técnicas avanzadas de control de corriente para garantizar su eficiencia energética. Entre las técnicas más comunes se encuentran la modulación de ancho de pulso (PWM^[4]), que ajusta la intensidad luminosa variando el tiempo de encendido y apagado del LED, y la atenuación basada en control de tiempo en el encendido de dispositivos como el Triac ^[5], que es un método simple y económico para reducir la cantidad de energía entregada a la fuente luminosa LED, controlando la fase de la corriente alterna. Estas dos técnicas permiten no solo optimizar el consumo de energía, sino también adaptar la iluminación a diferentes necesidades y ambientes, ya sea en el hogar, la industria o el ámbito comercial.

En cuanto a las fuentes de alimentación que controlan el manejo óptimo de los dispositivos de luz artificial con LEDs, son fuentes conmutadas, fundamentales para proporcionar el voltaje y la corriente adecuados a los LEDs. Estos circuitos electrónicos convierten a corriente constante o voltaje constante necesarios para alimentar los LEDs a la mayor eficiencia posible. Los convertidores de tipo buck ^[6], boost ^[7] o flyback ^[8] son comúnmente utilizados en estas aplicaciones, ya que, permiten ajustar el voltaje de entrada a voltaje o corriente de salida de manera eficiente, manteniendo el rendimiento del sistema mientras se minimiza la generación de calor y las pérdidas. El uso de fuentes conmutadas también facilita la regulación precisa de la corriente o voltaje al arreglo de LEDs, lo que es crucial para prolongar la vida útil de los mismos y garantizar un funcionamiento estable.

En la industria de los dispositivos electrónicos para control de iluminación con LEDs existen varios fabricantes especializados, como Texas Instruments ^[9], ON Semiconductor ^[10] y STMicroelectronics ^[11], entre otros. Estos fabricantes ofrecen soluciones avanzadas para el control de los sistemas LEDs, integrando elementos y sistemas denominados inteligentes, como, la corrección del factor de potencia (PFC)^[12],

4 PWM, Técnica de control de potencia modificando el ancho de pulso de una señal cuadrada por lo regular.

5 TRIAC, (Triodo para corriente alterna) es un componente semiconductor bidireccional que funciona como un interruptor electrónico para controlar la corriente alterna (AC) en ambas direcciones

6 Buck converter, convertidor DC/DC reductor de voltaje a la salida

7 Boost converter, convertidor DC/DC elevador de voltaje a la salida

8 Flyback converter, convertidor DC/DC con transformador de aislamiento reductor y/o elevador

9 Texas Instruments, fabricante de dispositivos electrónicos semiconductores

10 ON Semiconductors, fabricante de dispositivos electrónicos semiconductores

11 STMicroelectronics, fabricante de dispositivos electrónicos semiconductores

12 PFC, Corrección del factor de potencia, por normatividad superior a 0.9

protección contra sobrecarga y térmica, conmutación del tipo de fuente para regulación de corriente/voltaje constante, realimentaciones que permiten control de atenuación por PWM o directamente detectando el ángulo de la fase de la red eléctrica. Estos dispositivos permiten que los sistemas de iluminación LED sean más eficientes, más duraderos y más fáciles de integrar en diversas aplicaciones comerciales e industriales. Por ejemplo, el controlador TPS92410 de Texas Instruments, es un dispositivo lineal avanzado que regula la corriente media a través de los LEDs, manteniendo un alto factor de potencia y reduciendo la distorsión armónica total (THD [¹³]); este controlador se adapta a sistemas de iluminación de baja potencia y es especialmente útil en aplicaciones que requieren un control preciso de la intensidad luminosa y una protección robusta contra fallas térmicas y de voltaje.

Con base en estos avances, se propone el diseño de un sistema de iluminación LED para diferentes propósitos, utilizando el controlador de fuente conmutada FL7734. Este sistema incluye el uso de atenuadores “dimmer” [¹⁴] directos a la red eléctrica para ajustar la intensidad luminosa según la hora del día o el tipo de actividad que se esté realizando en el espacio iluminado. La implementación del sistema se centrará en garantizar una alta eficiencia energética, un control preciso de la luz y una protección adecuada para los LEDs, asegurando su durabilidad y optimizando el rendimiento en todo momento.

Este diseño permite no solo mejorar la calidad de la iluminación en el espacio, sino también contribuye a un uso más eficiente de la energía, alineándose con las tendencias actuales hacia soluciones sostenibles y tecnológicamente avanzadas en el campo de la iluminación.

13 THD, Distorsión total de armónicos, por normatividad debe ser bajo

14 Dimmer, Sistema atenuador, controla la intensidad de una Fuente luminosa

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la eficiencia energética y la sostenibilidad se han convertido en prioridades clave en el desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente en el ámbito de la iluminación. El uso de dispositivos LEDs ha demostrado ser una alternativa eficiente, duradera y ecológica frente a las tecnologías tradicionales. No obstante, para aprovechar al máximo sus beneficios, es necesario contar con sistemas de alimentación y control que permitan regular con precisión su funcionamiento, al tiempo que cumplan con los estándares de seguridad, factor de potencia, distorsión de armónicos y eficiencia establecidos por la normatividad vigente.

Esta tesis propone el diseño e implementación de una fuente conmutada que funcione como driver/controlador para sistemas de iluminación con LEDs, con la cualidad de atenuación directa por la red eléctrica. El proyecto busca responder a la creciente necesidad de soluciones versátiles, eficientes y de bajo costo; para entornos domésticos, comerciales y de oficina, donde la iluminación no solo cumple una función práctica, sino también estética y de confort.

El desarrollo de esta fuente conmutada contempla una revisión integral de los fundamentos de la iluminación artificial, la evolución tecnológica de los LEDs, y las técnicas de control más actuales. Asimismo, se investigarán las tecnologías de electrónica de potencia aplicadas a fuentes conmutadas y los dispositivos más relevantes utilizados en la industria para el control de sistemas de iluminación.

Este trabajo no solo tiene valor académico, sino también diseño y aplicación práctica, ya que se realiza una implementación de un sistema funcional que puede servir como base para desarrollos posteriores, tanto en aplicaciones comerciales como industriales. Además, busca aportar una solución tecnológica con las tendencias actuales de eficiencia energética, contribuyendo así al desarrollo de sistemas de iluminación inteligentes y sostenibles.

Por lo mencionado, este proyecto se justifica, ya que pone bases de desarrollo tecnológico y científico de actualidad para aplicaciones en la iluminación; área de la sociedad que por lo general no se tiene contemplada a grandes rasgos, más allá de lo estético y de confort. Se aplican los conocimientos adquiridos en estos años de Universidad y se desarrolla una aplicación específica para uso en diferentes entornos de la sociedad y que contribuye como una alternativa eficiente y ecológica.

CAPITULO I

Luz, iluminación, conceptos generales

1.1 Breve historia de la luz

*“Los seres humanos nacimos de la luz,
¡somos polvo de las estrellas!
y nuestro futuro está determinado por nuestro
pasado que observamos en un instante” [15]*

Desde el principio del universo la luz ha sido un elemento crucial en el desarrollo de la vida en la tierra, sin ella muchos procesos orgánicos no hubieran evolucionado y dado surgimiento a las diversas formas de vida en la tierra, entre ellas el hombre. El hombre, uno de los seres vivos que con el paso del tiempo ha cambiado su forma de sobrevivir en la Tierra; entre estos cambios un factor muy importante es la luz que ha incidido en nuestra evolución; el descubrimiento del fuego a lo largo del tiempo no se puede negar que ha sido muy importante para la humanidad, desde influir en nuestra alimentación y nuestro comportamiento. El fuego ha sido la primera forma de iluminar nuestro entorno, haciendo nuestro lugar de habitación más cómodo, de dejar nuestra dependencia de la luz del sol y la luna y, podernos trasladarnos hacia lugares que nos brindan mayor confort y seguridad. A partir del fuego el hombre suplió la necesidad de iluminar zonas que le permitieron realizar sus actividades. Partiendo de este punto, el uso del fuego, intentamos dar una explicación de que es la luz, quien, y como la brinda, además de como la podemos modificar y aplicar a nuestra diversidad de necesidades.

Las civilizaciones antiguas no pudieron brindar una explicación racional de la luz y la atribuyeron a una divinidad. Para los egipcios, la luz del día era la mirada de Ra, el dios del Sol. Para los persas era una de la fuerza de la naturaleza que adoraban junto al fuego, aire y tierra.

Los griegos rompieron con las ataduras de la magia y buscaron una explicación racional de los fenómenos de la naturaleza, filósofos como Pitágoras y Empédocles realizaron observaciones y experimentos sobre la naturaleza de la luz en la Grecia antigua. Sin embargo, fue hasta el siglo XVII cuando la óptica comenzó a ser estudiada de manera sistemática. Durante el Renacimiento, científicos como Leonardo da Vinci y Johannes Kepler realizaron importantes contribuciones al campo de la óptica. Da Vinci estudió la

15 Inspirado en las reflexiones de Carl Sagan sobre el origen estelar de la materia.

refracción de la luz y la formación de imágenes en el ojo humano, mientras que Kepler desarrolló las leyes de la óptica geométrica, las cuales describen cómo se comporta la luz al pasar a través de medios transparentes.

En el siglo XVIII, el científico inglés Thomas Young realizó experimentos con la luz y propuso la teoría de la interferencia, que explica cómo se producen los patrones de luz cuando dos ondas se superponen. Estos experimentos sentaron las bases de la óptica física, que estudia el comportamiento de la luz como una onda.

1.2 Aspectos generales sobre luz natural y luz artificial

La luz natural es la proveniente del sol y su espectro de frecuencias cubre una amplia gama de longitudes de onda que proporcionan una iluminación completa, permitiendo una visión clara de los colores y objetos con todos sus detalles. La luz artificial, como las lámparas LED, se utiliza para replicar esta luz natural, aunque generalmente tiene un espectro de emisión más limitado; la tecnología de iluminación con LEDs ha avanzado significativamente, permitiendo una mayor eficiencia energética y una mejor calidad de la luz, emitiendo menos calor en comparación con otras fuentes de luz artificial como las lámparas incandescentes y las fluorescentes.

Es importante notar que el término “lámpara” se refiere al utensilio o aparato que sostiene las luces artificiales; en lenguaje coloquial el concepto se aplica a las diferentes formas para producir luz artificial; por ejemplo, una lámpara incandescente usa el fenómeno de incandescencia en un cuerpo que se calienta para emitir luz.

1.3 Teorías de la luz

La luz ha sido objeto de diversas teorías científicas a lo largo de la historia, cada una aportando una visión distinta sobre su naturaleza y comportamiento. Estas teorías se desarrollaron a medida que avanzaban los estudios y experimentos, lo que permitió una comprensión más profunda de los fenómenos luminosos.

LA TEORÍA CORPUSCULAR, propuesta por Isaac Newton en el siglo XVII, sugería que la luz estaba formada por partículas muy pequeñas, llamadas corpúsculos, que se movían a alta velocidad. Esta teoría explicaba fenómenos como la reflexión y la refracción de la luz, ya que los corpúsculos interactuaban con las superficies de los materiales de manera elástica, lo que les permitía cambiar de dirección y producir los efectos observados.

Por otro lado, **LA TEORÍA ONDULATORIA**, desarrollada por Huygens a finales del siglo XVII y más tarde ampliada por Young y Fresnel, postulaba que la luz se comportaba como una onda. Esta teoría pudo explicar fenómenos como la interferencia y la difracción, ya que las ondas de luz podían superponerse y alterar su amplitud dependiendo de su fase. Maxwell, en el siglo XIX, unió la teoría ondulatoria con su propio trabajo sobre el electromagnetismo, demostrando que la luz era una forma de radiación electromagnética, es decir, una onda de campos eléctricos y magnéticos oscilantes perpendicularmente entre sí.

A principios del siglo XX, **LA TEORÍA CUÁNTICA DE LA LUZ**, propuesta por Max Planck, introdujo la idea de que la luz no era continua, sino que estaba compuesta por pequeños paquetes de energía llamados fotones. Esta teoría resolvió fenómenos que no podían explicarse mediante la teoría ondulatoria, como el efecto fotoeléctrico, en el cual la luz produce una corriente al interactuar con ciertos materiales. Sin embargo, la teoría cuántica no pudo explicar otros fenómenos de la luz, lo que llevó a un debate entre la naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz, que hoy en día se concibe como una dualidad.

Las propiedades fundamentales de la luz incluyen la reflexión, que puede ser especular o difusa dependiendo de la superficie; la absorción, donde los objetos pueden convertir la luz en calor; la difracción, que describe cómo las ondas de luz se curvan alrededor de objetos; la refracción, que es el cambio en la dirección de la luz al pasar de un medio a otro; y la dispersión, que ocurre cuando la luz blanca se descompone en sus colores componentes al pasar por un prisma.

Además, debemos notar de manera lo más clara posible qué la visión humana juega un papel crucial en la percepción de la luz, ya que el ojo humano detecta las ondas electromagnéticas en un rango específico de longitudes de onda y con mecanismos específicos.

Estas teorías y sus respectivas contribuciones han sido clave para la comprensión moderna de la luz, que no solo incluye su propagación en diversos medios, sino también su interacción con la materia y su percepción por parte de los seres humanos, Figura1.1.

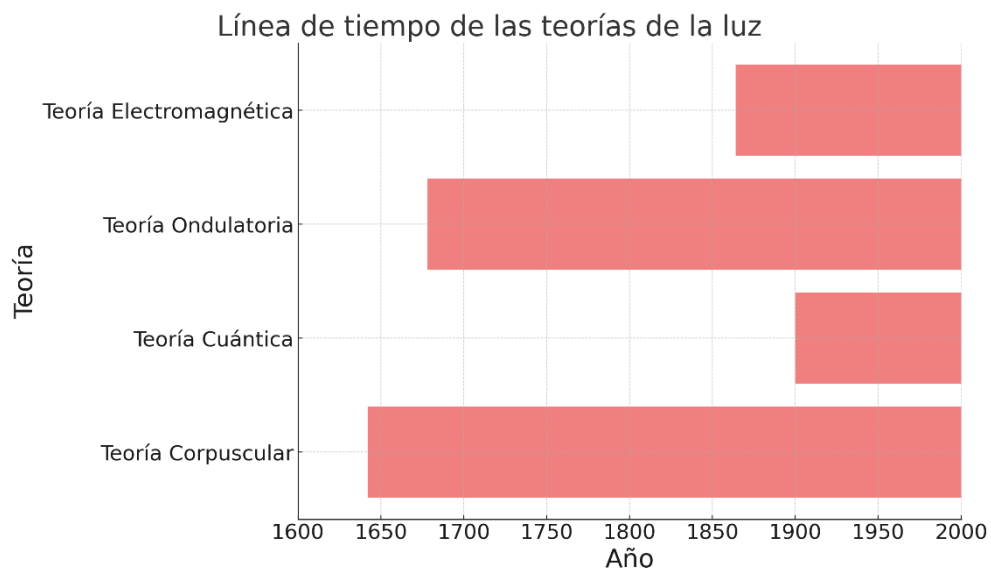


Figura 1.1 Línea de tiempo en el desarrollo de las teorías de la luz.

1.4 Definiciones

1.4.1 Cantidad de luz (lumen)

El lumen (lm) es la unidad de medida de flujo luminoso, mide la cantidad de luz visible emitida por una fuente. En los LEDs, la cantidad de luz producida es muy eficiente, con altos valores de lúmenes por watt (lm/W) en comparación con otras fuentes de luz tradicionales.

1.4.2 Intensidad luminosa (candela)

La intensidad luminosa mide cuánta luz se emite en una dirección particular, y se mide en candelas (cd). En los sistemas LEDs, esta intensidad se puede controlar mejor debido a la dirección precisa del haz de luz, lo que mejora la eficiencia en la distribución espacial del flujo luminoso.

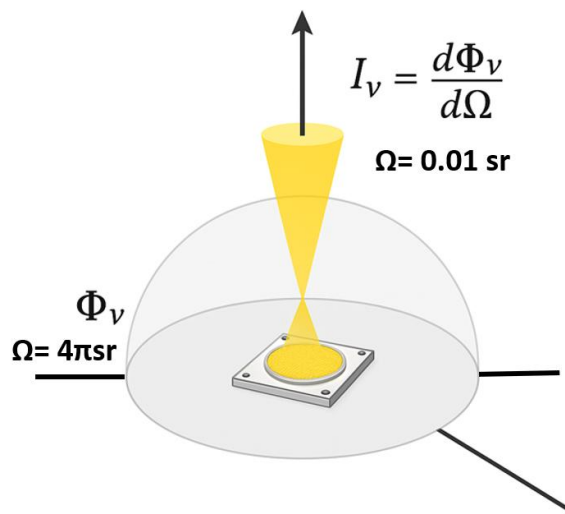


Figura 1.2 Definición de flujo luminoso (Φ_v Lumen) e intensidad luminosa (I_v Candela)

1.4.3 Cantidad de iluminación o iluminancia (lux)

El lux (lx) mide la cantidad de luz que incide sobre una superficie. Depende tanto de la intensidad luminosa como de la distancia entre la fuente de luz y la superficie iluminada. Los LEDs permiten un control preciso de la cantidad de lux, ajustando la dirección y dispersión de la luz.

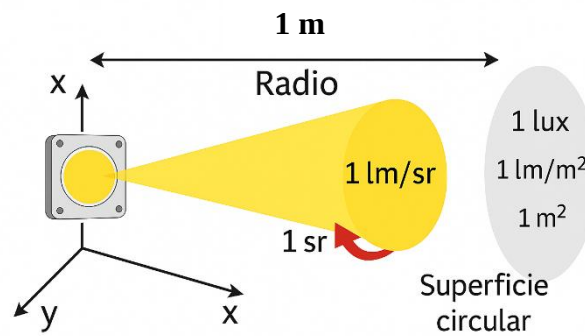


Figura 1.3 Definición de Iluminancia, un ejemplo.

1.4.4 Temperatura de color [°K]

La temperatura de color, medida en grados Kelvin (°K), indica el “color” de la luz, de qué color ve el ser humano la luz emitida por una fuente luminosa. Por ejemplo, la luz “cálida” tiene una temperatura de color de alrededor de 3000 K, similar a la de las lámparas incandescentes, mientras que la luz fría tiene temperaturas superiores a los 5000 K; este parámetro es un símil con la emisión de un cuerpo que se ha calentado a esas temperaturas y como el observador ve el cuerpo incandescente. Los LEDs permiten una amplia gama de temperaturas de color y son ajustables, desde luz cálida hasta luz fría, permite “crear” un ambiente “cálido” o “frío” del espacio iluminado.



Figura 1.4 Temperatura de color, algunos tipos.

1.4.5 Rendimiento de color [IRC]

El Índice de Rendimiento de Color (IRC) mide la capacidad de una fuente de luz para mostrar los colores de los objetos de manera fiel. Los LEDs modernos tienen un alto IRC, lo que mejora la visibilidad y la apariencia natural de los colores en comparación con otras fuentes de luz, como las lámparas fluorescentes.



Figura 1.5 Índice de Reproducción Cromática.

CAPITULO II

La tecnología de luz con diodos emisores (*LEDS*)

2.1 La tecnología de luz con diodos emisores

Los LEDs han avanzado significativamente en términos de eficiencia energética, durabilidad y rendimiento espectral. A medida que los LEDs se han optimizado para iluminación general han reemplazado tecnologías tradicionales como las lámparas incandescentes, fluorescentes y de descarga. La tecnología de iluminación con base de LEDs supera a otras tecnologías de iluminación en eficiencia luminosa y vida útil, y se espera que continúe evolucionando de manera ecológica.

2.2 Mecanismos para producir luz blanca con LEDs

Existen dos enfoques principales para generar luz blanca con LEDs:

2.2.1 Combinación de LEDs

Este método emplea LEDs de colores azul, verde y rojo, cuyos espectros de emisión se combinan para crear luz blanca. Este enfoque evita la creación de luz en longitudes de onda no deseadas y permite un control preciso sobre el color de la luz producida, gran desventaja es la reproducción cromática de los objetos iluminados, es muy bajo su IRC.

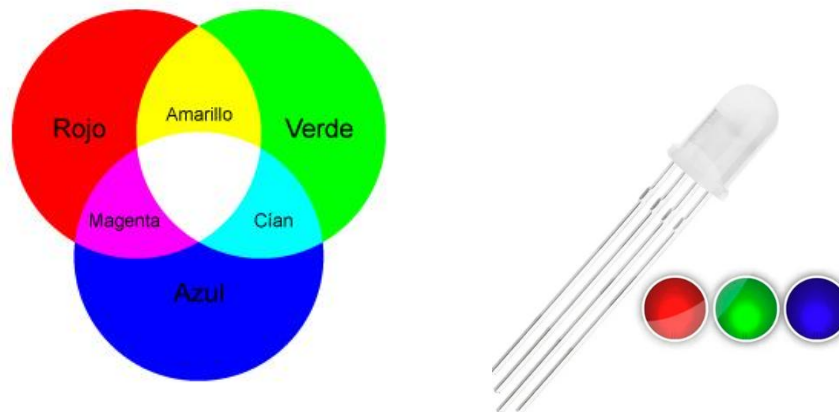


Figura 2.1 Mecanismo de combinación de leds para producir luz blanca

2.2.2 Conversión por fosforización

Un LED de emisión azul o rojo es combinado con fósforos verdes y rojos que convierten la luz azul en otras longitudes de onda, produciendo luz blanca. Esta técnica es ampliamente utilizada debido a la alta eficiencia de los fósforos, que tienen rendimientos cuánticos internos superiores al 90%. Más adelante documentaremos sobre los tipos de semiconductores que generan longitudes de onda que combinados con capas de fósforos generan luz blanca de manera muy eficiente y de altos IRC.

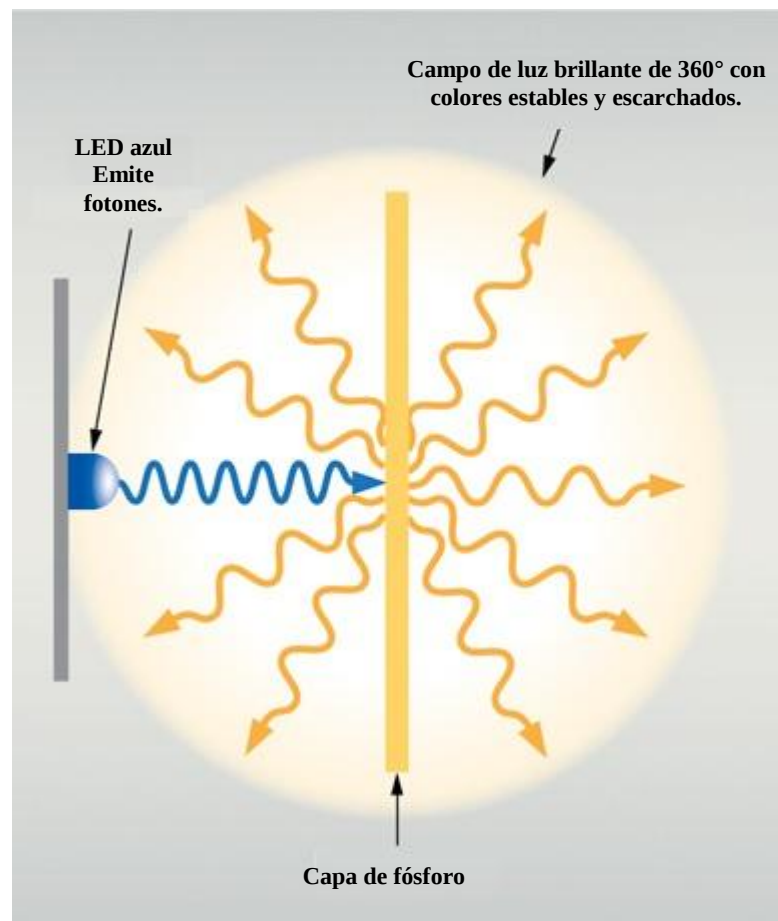


Figura 2.2 Generación de luz blanca con fósforos.

2.3 Principios de funcionamiento del LED, el semiconductor

Los LEDs están basados en diodos con semiconductores que emiten luz cuando una corriente eléctrica los atraviesa. Estas uniones de semiconductores, como el nitruro de galio (GaN), son eficientes en la conversión de corriente eléctrica en luz. La eficiencia de un LED se ve afectada por factores como la recombinación de electrones dentro de los

semiconductores no radiativa [16] y la resistencia interna por impurezas, lo que limita la cantidad de energía convertida en luz visible.

Enfatizamos que el LED es un dispositivo semiconductor DIODO, por lo que sus principios de funcionamiento son definidos por la unión básica PN de semiconductores, lo cual trataremos en el Capítulo 3 de este documento.

2.4 El sistema integrado entre semiconductor y encapsulado del LED

El encapsulado del LED juega un papel crucial en su desempeño, ya que ayuda a disipar el calor generado durante la operación y a dirigir la luz de manera eficiente. Los avances en la integración del semiconductor con el encapsulado han mejorado la eficiencia luminosa y la vida útil de los LEDs, permitiendo su uso en una variedad de aplicaciones y estilos físicos que combinan de una manera más estética con su funcionalidad.

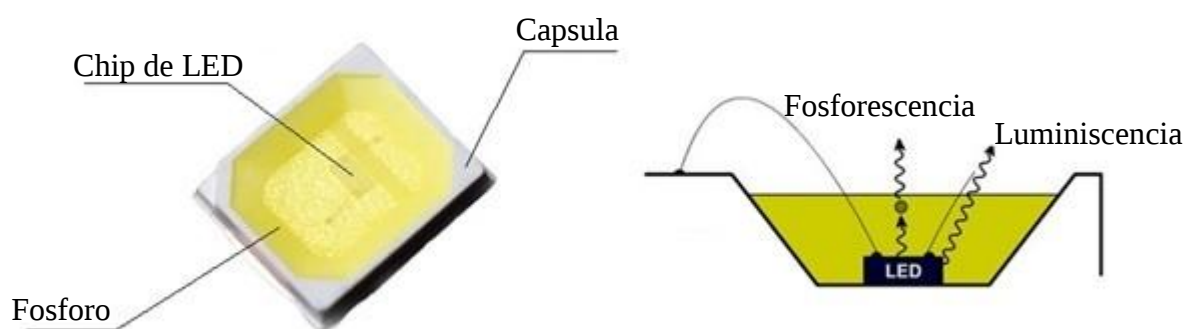


Figura 2.3 LED de luz blanca, componentes básicos que lo forman.

2.5 LED de luz blanca

La luz blanca generada por LEDs puede ser obtenida utilizando una combinación de LEDs de diferentes colores o mediante fósforos que convierten la luz azul en otros colores. Los LEDs de luz blanca se caracterizan por su capacidad para producir luz con un índice de reproducción cromática (IRC) alto, lo que significa que pueden mostrar los colores de los objetos de manera más fiel. Para comprender como se genera la luz blanca vamos a explicar el sistema de color CIE [17] a continuación.

16 No Radiativa, son materiales en los que la energía liberada durante la recombinación de electrones y huecos se disipa principalmente en forma de **calor** (vibraciones reticulares o fonones), en lugar de emitirse como luz

17 CIE. Comisión Internacional de Iluminación

2.6 El sistema de color CIE (Comisión Internacional de Iluminación)

La CIE ha establecido un sistema para caracterizar los colores de las fuentes de luz, incluyendo la luz producida por LEDs. El sistema CIE permite describir de manera precisa la distribución espectral de la luz, lo que es crucial para aplicaciones donde la precisión del color es importante, como en la iluminación de museos o tiendas.

El sistema de color CIE es fundamental para la estandarización y la comprensión de la percepción del color en la iluminación. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) desarrolló este sistema con el fin de proporcionar un marco de referencia para la medición y comparación de colores en función de cómo los seres humanos los perciben. El sistema es utilizado globalmente para definir características como el color, la intensidad y la temperatura de color de las fuentes de luz.

El modelo CIE se basa en la espectroscopía de la luz visible y un método de estimación de color de la visión humana. Los primeros avances en la teoría de la luz y color por parte de la CIE condujeron al desarrollo de las curvas de cromaticidad, que proporcionan una representación visual precisa de la relación entre la luz que emite una fuente y su color percibido. Estas curvas de cromaticidad son una herramienta esencial para el diseño y control de la luz en diversos sectores, como el diseño de interiores, la fotografía y la iluminación arquitectónica.

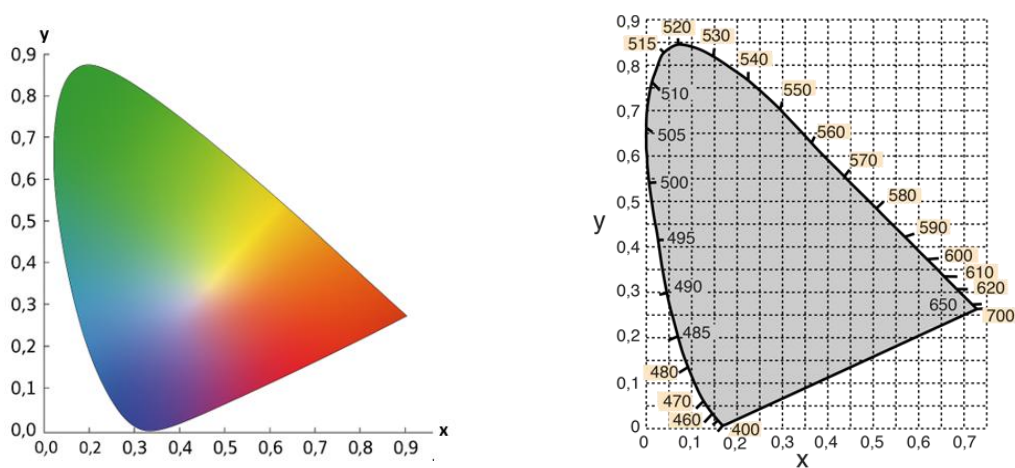


Figura 2.4 Diagrama de cromaticidad CIE con los colores percibidos por el ojo humano. Ejes X y Y índice de percepción del color, contorno indica la longitud de onda del color.

El sistema CIE se ha diversificado a lo largo del tiempo, y entre sus desarrollos más importantes están los diagramas de cromaticidad, que muestran las características del color de una fuente de luz en función de sus componentes espectrales. Estos diagramas

son fundamentales para calcular y comparar colores de luces en diferentes ambientes. Además, los estándares de la CIE incluyen el índice de reproducción cromática (IRC), que mide la capacidad de una fuente de luz para reproducir los colores de los objetos de manera fiel.

En el campo de la iluminación, el sistema de color CIE también ha permitido el desarrollo de criterios técnicos para la producción de luz artificial que emulé con mayor precisión la luz natural, lo que es esencial para diversas aplicaciones en el diseño de espacios y la industria de la iluminación. La regulación de la temperatura de color, que se mide en grados Kelvin (K), es un ejemplo de cómo la CIE define las características perceptuales de las fuentes de luz, especialmente cuando se busca crear ambientes con una iluminación específica.

CIE tiene recomendaciones para el cálculo de niveles de iluminación basados en los lúmenes de las fuentes luminosas, el método de los lúmenes, se usa para el cálculo de los niveles de iluminación del alumbrado en interiores. La finalidad de este método es calcular el valor medio en servicio de la iluminancia en un local iluminado con alumbrado general. Es muy práctico y fácil de usar, y por ello se utiliza mucho en la iluminación de interiores cuando la precisión necesaria no es muy alta como ocurre en la mayoría de los casos.

El proceso a seguir se puede explicar mediante el siguiente diagrama de bloques. Figura 2.5.

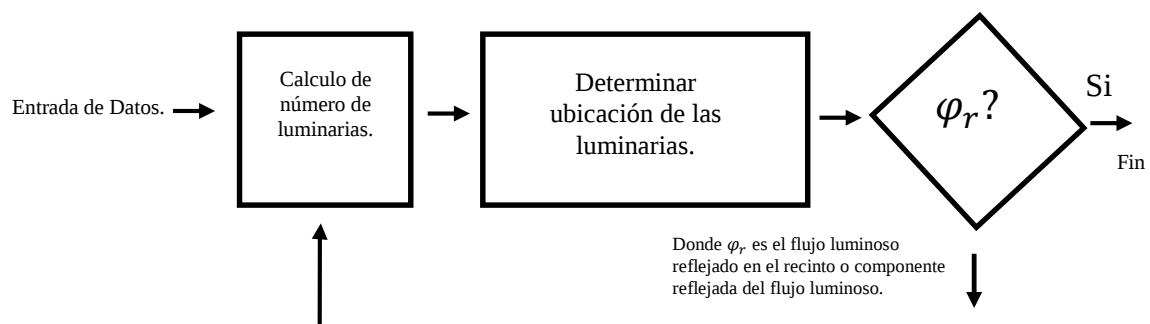


Figura 2.5 Proceso de cálculo de luminarios definido por el CIE.

CAPÍTULO III

Control de LEDs. Voltaje o Corriente.

3.1 El diodo, principio de funcionamiento

Un diodo es un componente electrónico que permite el paso de corriente en una sola dirección. En el caso de los LEDs, el principio fundamental de funcionamiento se basa en la electroluminiscencia. Esta es la emisión de luz generada por el movimiento de electrones dentro de un material semiconductor. Los LEDs están formados por un diodo semiconductor compuesto por dos tipos de materiales: un material tipo P (con una abundancia de huecos) y un material tipo N (con abundancia de electrones). Cuando un voltaje adecuado se aplica a la unión P-N, los electrones se mueven de la región N a la región P, recombinándose con los huecos disponibles. Esta recombinación libera energía en forma de fotones (luz). El modelo matemático de funcionamiento del diodo lo muestra la ecuación 3.1.

$$I = I_S \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

I	Corriente a través del diodo
I_S	Corriente de saturación inversa (muy pequeña)
q	Carga del electrón (1.602×10^{-19} C)
V	Voltaje aplicado al diodo
n	Factor de idealidad (típicamente 1 a 2)
K	Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)
T	Temperatura absoluta en ° Kelvin

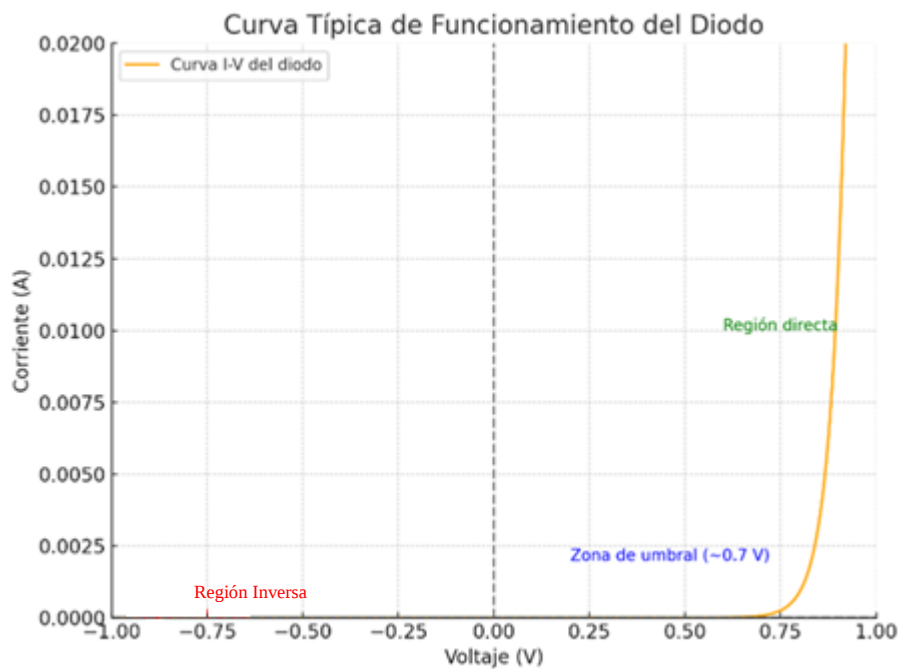


Figura 3.1 Curva típica de funcionamiento del DIODO, un ejemplo.

La intensidad de la luz generada depende directamente de la corriente eléctrica que atraviesa el diodo. En el caso de los LEDs, la longitud de onda (color) de la luz emitida está determinada por la banda de energía del material semiconductor utilizado. Este aspecto varía dependiendo de los materiales (como InGaN para LEDs azules y AlGaAs para LEDs rojos) y afecta la eficiencia del dispositivo.

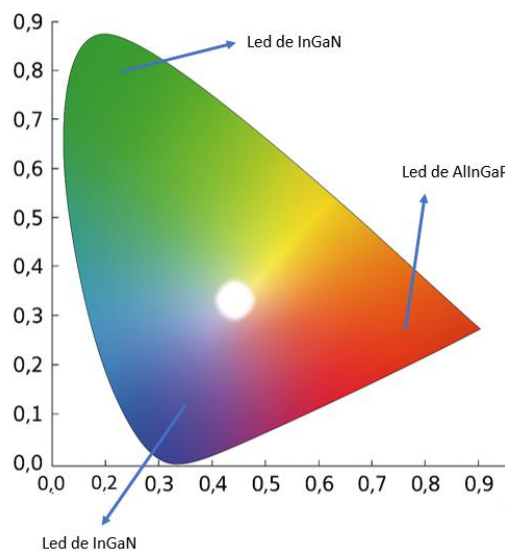


Figura 3.2 Diagrama CIE que muestra los principales semiconductores que se usan para generar luz blanca.

3.2 Tipos de diodos para luz artificial

Los LEDs se dividen principalmente en dos tipos según su emisión:

- LEDs monocromáticos: Emite luz de una sola longitud de onda, generalmente en los rangos de rojo, verde y azul. Estos se emplean ampliamente en aplicaciones de señalización, pantallas y semáforos.
- LEDs blancos: Son los utilizados para iluminación general y se fabrican principalmente de dos maneras:

Por combinación de LEDs de diferentes colores: Se emplean LEDs rojos, verdes y azules, combinados de manera adecuada para producir luz blanca. Esta técnica, sin embargo, enfrenta desafíos relacionados con la eficiencia y la reproducción cromática, especialmente para los colores verde y ámbar, donde los LEDs no son tan eficientes como el azul.

Por conversión de fósforo: En un caso, se utiliza un LED azul lo más cercano al dentro del diagrama CIE, que excita un fósforo amarillo o rojo, resultando en la emisión de luz blanca. Esta es la tecnología más comúnmente usada para LEDs blancos de alta eficiencia.

3.3 Ejemplos de diodos emisores de luz blanca, curvas de polarización y funcionamiento.

Las curvas de polarización son fundamentales para entender cómo los LEDs responden a los voltajes aplicados. Para un LED típico, su polarización directa se logra aplicando un voltaje en la dirección correcta, lo que permite el flujo de corriente a través de la unión P-N. Dependiendo de la corriente aplicada, el LED cambiará su intensidad luminosa; sin embargo, si el control excede ciertos límites, el dispositivo puede dañarse, por lo que es crucial manejar adecuadamente el voltaje o la corriente en el dispositivo. En lo siguiente daremos un ejemplo de LED del fabricante Bridgelux [18] sus características y propondremos un modelo matemático del mismo.

18 BRIDGELUX. Empresa norteamericana, desarrolla y fabrica tecnologías de iluminación de bajo consumo basadas en diodos emisores de luz (LED).

3.4 Led COB del fabricante Bridgelux.

La tecnología Bridgelux COB (Chip-On-Board) es uno de los avances más importantes en la iluminación LED. En este diseño, múltiples chips LED se colocan directamente sobre un sustrato común, lo que permite una emisión de luz uniforme y alta eficiencia térmica. La configuración COB es especialmente útil en aplicaciones de iluminación de alta potencia, como en luminarios de calles y avenidas, luminarias industriales y proyectos comerciales donde la eficiencia y la durabilidad son esenciales.

Uno de los principales beneficios de los Bridgelux COB LEDs es su capacidad para manejar grandes cantidades de calor sin comprometer el rendimiento, gracias a la tecnología de disipación de calor avanzada que utilizan. Estos LEDs están diseñados para operar con un voltaje constante y con una corriente ajustada, lo que garantiza una alta eficiencia luminosa sin riesgo de sobrecalentamiento. A continuación, mostramos el LED COB. La figura 3.3 muestra el dispositivo y la tabla 3.1 sus especificaciones.



Figura 3.3 LED COB del fabricante Bridgelux Gen 7 Vero 18 Array

Número de pieza	Temperatura de color CCT (°K)	Rendimiento de color IRC (%)	Corriente nominal (mA)	Flujo luminoso (lm)	Voltaje del LED Vf (V)	Potencia (W)	Eficacia típica (lm/W)
BXRC-30C4001-D-74	3000	70	1050	5359	29	30.5	176

Tabla 3.1. Especificaciones del modelo BXRC-30C4001-D-74.

Para generar un modelo matemático del comportamiento del LED, de dos gráficas del fabricante se tomaron 5 puntos de operación para Voltaje respecto a corriente y de flujo luminoso respecto a corriente. Las figuras 3.4 y 3.5 y las tablas 3.2 y 3.3 muestran estos elementos. El modelo matemático lo documentamos en el apartado 3.5

Voltaje (V)	Corriente (mA)
27.0	250
28.0	625
29.0	1000
30.0	1400
31.0	1875

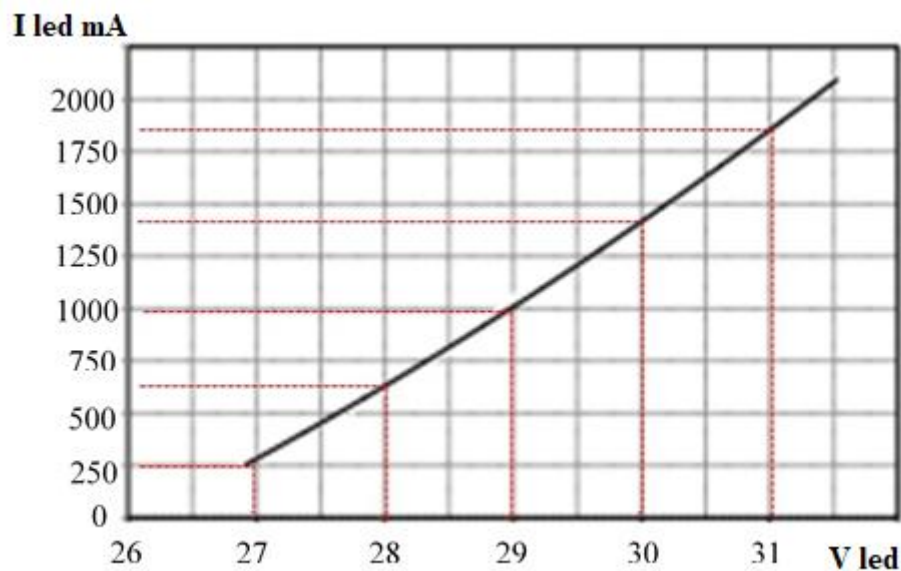


Figura 3.4. Relación Corriente vs Voltaje del LED Bridgelux modelo Vero 18D [¹⁹]

Tabla 3.2. Valores de Voltaje-Corriente para generar el modelo matemático del LED, algunos puntos de operación.

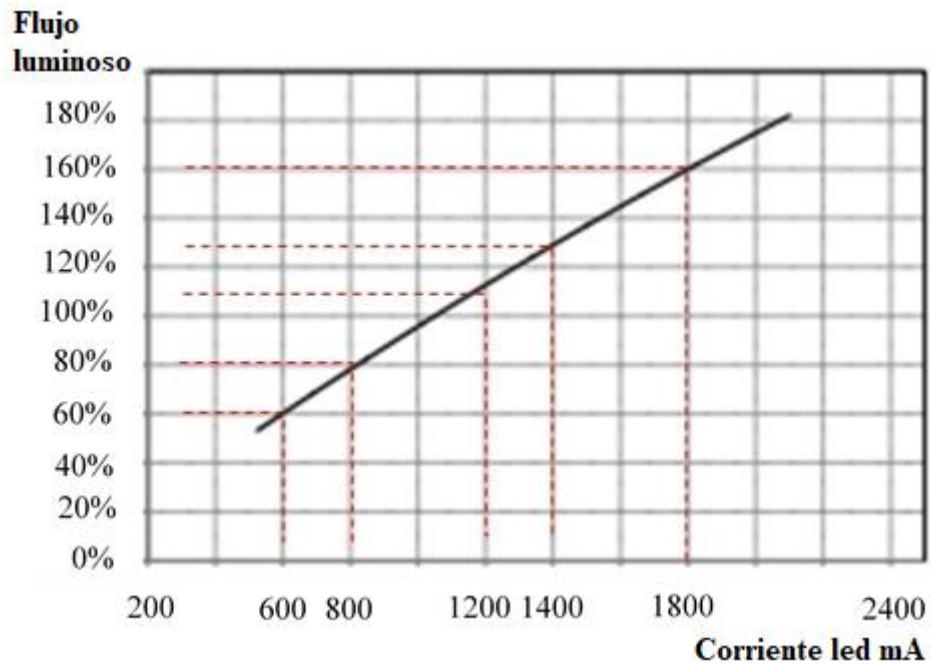


Figura 3.5 Relación Corriente de LED vs Flujo luminoso del modelo Vero 18D,

Corriente (mA)	Flujo Relativo (%)
600	60
800	80
1200	110
1400	130
1800	160

Tabla 3.3 Valores de Flujo luminoso-Corriente para generar el modelo matemático del LED, puntos de operación.

3.5 Modelo Matemático de LED Bridgelux COB.

El modelo matemático de un LED COB tiene en cuenta varios factores para describir su rendimiento:

1. Relación entre corriente y voltaje: El rendimiento de un LED COB se puede describir con una corrección para las características no lineales de la curva del LED. La relación básica entre la corriente y el voltaje de un LED la presentan los fabricantes con curvas de funcionamiento por su carácter no lineal.
2. Debido a la relación anterior, el flujo luminoso del LED también tiene una curva de funcionamiento no lineal. El fabricante la presenta también en graficas de Flujo relativo-Corriente.

El modelo matemático puede ser ajustado para diferentes aplicaciones de control de corriente y voltaje, garantizando que el LED funcione dentro de sus límites operativos para maximizar su vida útil, eficiencia y flujo emitido.

```
% Modelo polinomial del LED Vero 18D
% Cargar datos
load('modelo_polinomial_vero18d.mat');

% Asegurar tipo double
corriente = double(corriente);
flujo_relativo = double(flujo_relativo);

% Extraer coeficientes
a = modelo_coef.a;
b = modelo_coef.b;
c = modelo_coef.c;

% Crear rango de corriente para graficar
I = linspace(min(corriente), max(corriente), 200);

% Evaluar el modelo polinomial
Phi = a .* I.^2 + b .* I + c;

% Calcular R^2
y_est = a * corriente.^2 + b * corriente + c;
ss_res = sum((flujo_relativo - y_est).^2);
ss_tot = sum((flujo_relativo - mean(flujo_relativo)).^2);
r_squared = 1 - ss_res/ss_tot;

% Graficar
figure;
plot(I, Phi, 'b-', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(corriente, flujo_relativo, 'ro', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 1.5);
grid on;
xlabel('Corriente Directa (mA)');
ylabel('Flujo Luminoso Relativo (%)');
title('Modelo Polinomial del LED COB Vero 18D');
legend('Modelo Polinomial', 'Datos Originales', 'Location', 'NorthWest');

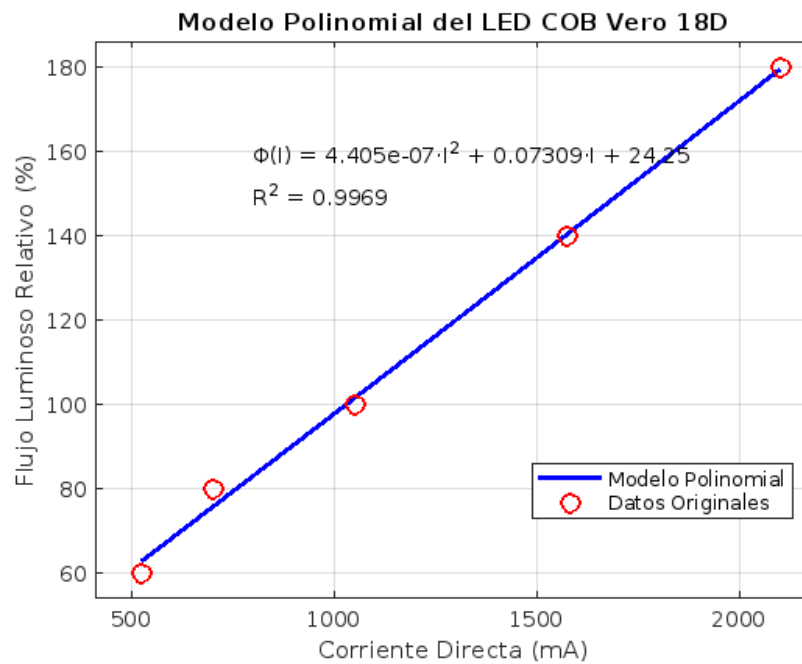
% Mostrar la ecuación polinomial en la gráfica
eq_str = sprintf('Φ(I) = %.4g·I^2 + %.4g·I + %.2f', a, b, c);
text(800, 160, eq_str, 'FontSize', 10);
text(800, 150, sprintf('R^2 = %.4f', r_squared), 'FontSize', 10);

% Guardar la imagen
saveas(gcf, 'modelo_polinomial_vero18d_con_ecuacion.png');
```

Figura 3.6 Archivo fuente para generar modelo matemático de la curva de operación del LED COB

Con apoyo de la Aplicación Curvefitter de Matlab [20] generamos los modelos matemáticos de funcionamiento del led COB de Bridgelux. La figura 3.6 muestra el archivo fuente para Matlab y a continuación, en la figura 3.7 mostramos los resultados y el polinomio que ajusta la curva.

Curva que genera MATLAB.



$$\phi = 4.405e^{-7} I_{led}^2 + 0.07309 I_{led} + 24.25 [lm] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Figura 3.7 Modelo matemático del LED COB BXRC-30C4001-D-74

CAPÍTULO IV

Controladores inteligentes para iluminación con LEDs (DRIVERS).

4.1 Antecedentes. Fuentes conmutadas y sus tipos.

En el campo de la electrónica de potencia, las fuentes conmutadas (SMPS, por sus siglas en inglés: Switched-Mode Power Supplies) han sido ampliamente utilizadas debido a su alta eficiencia, bajo peso, tamaño compacto y capacidad de adaptación a diferentes condiciones de carga y suministro eléctrico de entrada.

A diferencia de las fuentes lineales tradicionales, que disipan la energía excedente en forma de calor, las fuentes conmutadas modulan la energía mediante tiempos de conmutación rápidos y controlados de sus elementos de potencia. Esto permite mantener una salida regulada incluso cuando hay variaciones en la entrada o en la carga conectada.

En el contexto de la iluminación con LEDs, estas fuentes cumplen la función de drivers o controladores que regulan y acondicionan la energía para que sea compatible con las características eléctricas de los dispositivos emisores de luz. Un driver adecuado es esencial para garantizar la durabilidad, estabilidad luminosa y seguridad del sistema de iluminación.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama a bloques general de una fuente conmutada.

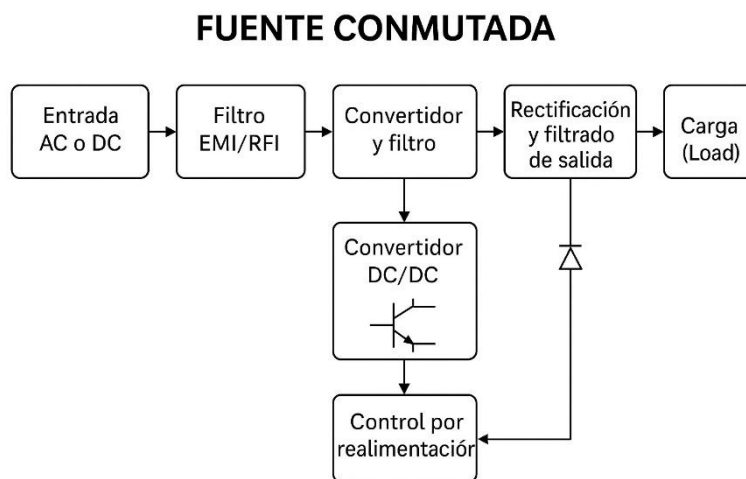
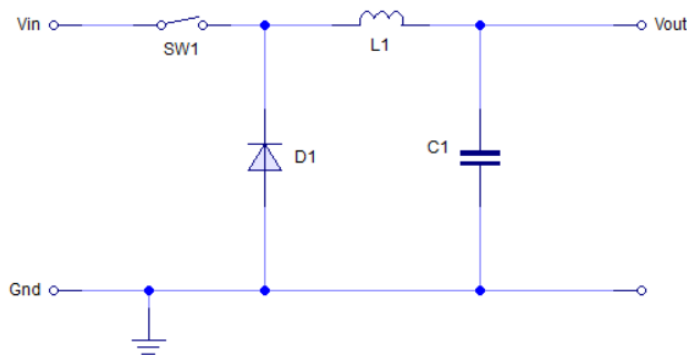


Figura 4.1 Diagrama general de una fuente conmutada

A continuación, describiremos de manera general los tipos de fuentes conmutadas básicos, las cuales son utilizadas como drivers para LEDs.

4.1.1 Convertidor Buck (reductor)

Como lo indica reduce el voltaje de entrada a un nivel inferior de salida. Es aplicado cuando el voltaje de entrada es mayor a la requerida por los LEDs. Se caracteriza por su eficiencia y simplicidad.

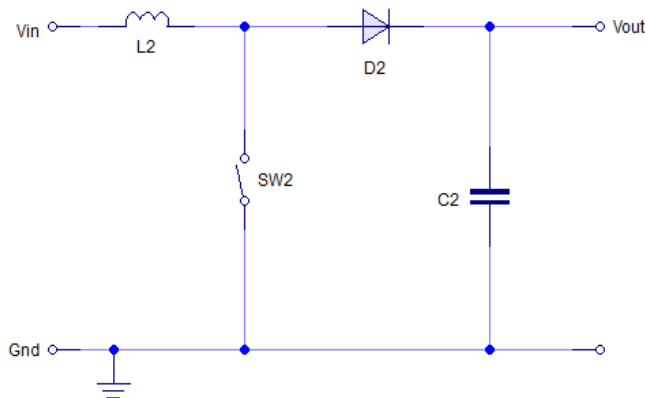


- Vin: Fuente de voltaje de entrada (más alta que Vout).
- SW1 (Interruptor): Comúnmente es un Transistor controlado por PWM.
- D1 (Diodo): Conduce corriente cuando el interruptor está abierto.
- L1 (Inductor): Almacena energía cuando SW1 está cerrado y la entrega a la carga cuando está abierto.
- C1 (Capacitor): Filtra el ruido y estabiliza Vout.
- Vout: Salida de menor voltaje.
- GND: Tierra de referencia.

Figura 4.2 Diagrama general del Convertidor Buck

4.1.2 Convertidor Boost (elevador)

Aumenta el voltaje de entrada a la salida. Se emplea cuando se requiere alimentar múltiples LEDs en serie desde una fuente de menor voltaje, como baterías.

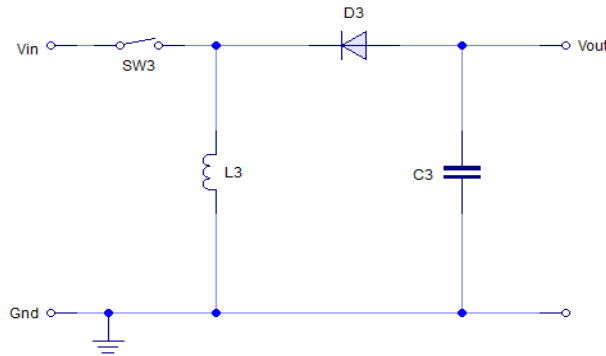


- Vin: Fuente de entrada (menor que la deseada en Vout).
- L2 (Inductor): Almacena energía cuando el interruptor está cerrado.
- SW2 (Interruptor): Controlado por PWM, controla el nivel de energía que se va a almacenar en L2, con el paso de corriente a GND, comúnmente se usa un Transistor.
- D2 (Diodo): Bloquea el retorno de energía, pero conduce cuando el inductor libera su energía hacia la salida.
- C2 (Capacitor): Almacena la energía entregada por el inductor para mantener estable la salida.
- Vout: Voltaje de salida más alto que Vin.
- GND: Tierra de referencia.

Figura 4.3. Diagrama general del Convertidor Boost

4.1.3 Convertidor Buck-Boost (Elevador-Reductor)

Aumenta o disminuye el voltaje a la salida, dependiendo de la relación de entrada y salida. Es versátil para condiciones variables de alimentación.

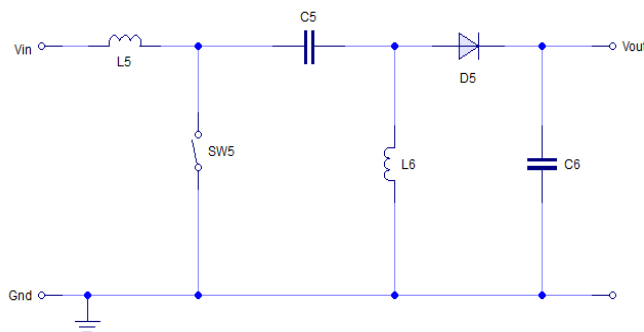


- SW (Interruptor): controla el almacenamiento de energía en el inductor.
- L (Inductor): se carga mientras el interruptor está cerrado.
- D (Diodo): se polariza directamente cuando el interruptor abre, permitiendo que el inductor transfiera su energía al capacitor.
- C (Condensador): suaviza la tensión de salida.
- Vout: salida negativa respecto a GND (cuando está referenciada correctamente).

Figura 4.4. Diagrama general del Convertidor Buck-Boost

4.1.4 Convertidor SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter)

Permite obtener una salida mayor o menor que la entrada manteniendo la misma polaridad, siendo útil en aplicaciones con fuentes de energía inestables.

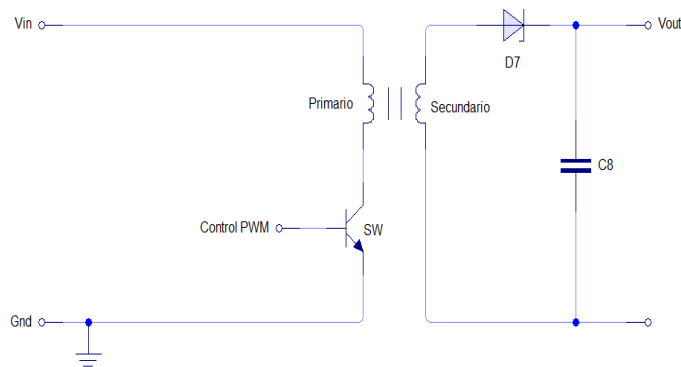


- L5 Inductor de entrada (puede ser acoplado con L6)
- C5 Condensador de acoplamiento (transfiere energía)
- SW5 Interruptor (MOSFET o transistor controlado)
- L6 Segundo inductor (puede ser acoplado con L5)
- D5 Diodo de rectificación
- C6 Condensador de salida
- Vin Voltaje de entrada
- Vout Voltaje de salida (misma polaridad que Vin)
- GND Tierra de referencia común

Figura 4.5 Diagrama general del Convertidor SEPIC

4.1.5 Convertidor Flyback.

Ampliamente utilizado en aplicaciones que requieren aislamiento galvánico entre la entrada y la salida. Es común en drivers que controlan a corriente constante los LEDs ofrece buena relación costo-eficiencia para potencias moderadas.



- Vin Entrada de voltaje en corriente.
- Primario Bobina del transformador donde se almacena energía.
- SW (con PWM) Interruptor (MOSFET) que conmuta el primario.
- Secundario (Bobina de salida del transformador).
- D7 Diodo rectificador de salida.
- C8 Capacitor de filtrado que estabiliza Vout.
- GND Tierra común del circuito

Figura 4.6 Diagrama general del Convertidor Flyback

La selección del tipo de fuente conmutada depende de factores como la arquitectura del arreglo de LEDs, si se requiere de aislamiento, las características de la fuente de energía primaria, las condiciones ambientales de operación, entre otros requerimientos.

Para el proyecto objetivo de este documento se aplicará el driver de INFINEON FL7734, que documentaremos en el apartado 4.4. La aplicación es de una fuente conmutada tipo Buck-Boost.

4.1.6 Funcionamiento del Convertidor Flyback.

El convertidor Flyback es una topología derivada del convertidor buck-boost, que utiliza un transformador en lugar de un inductor simple. La energía se transfiere desde el lado primario al lado secundario del transformador a través de un proceso de carga y descarga del campo magnético.

Con referencia a la figura 4.6, de manera general: Durante el encendido del interruptor (generalmente un MOSFET controlado por el driver), la corriente fluye a través del devanado primario del transformador, almacenando energía en el núcleo magnético. En esta etapa, el diodo del lado secundario se encuentra inversamente polarizado y no conduce, como se observa en la figura 4.7, etapa de interruptor encendido. Cuando el interruptor se apaga, como se observa en la figura 4.8, el campo magnético induce una corriente en el devanado secundario, polarizando directamente el diodo y permitiendo el

paso de corriente hacia la carga. La energía almacenada en el transformador se transfiere entonces a la salida. A continuación de manera específica se detallan ambas fases de funcionamiento del convertidor

4.1.6.1 Primera etapa.

En el regulador Flyback, hay dos operaciones de circuito: una es la fase de encendido (Primera etapa), cuando el devanado primario del transformador se carga, y la otra es la fase de apagado o transferencia del transformador (Segunda etapa), cuando la energía eléctrica se transfiere del primario al secundario y finalmente a la carga.

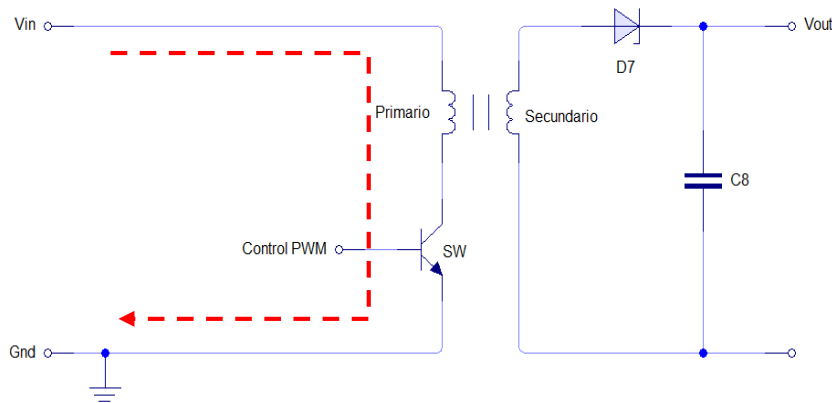


Figura 4.7 Funcionamiento de la primera etapa, interruptor encendido.

Si suponemos que el interruptor ha estado apagado durante mucho tiempo, la corriente en el circuito es 0 y no hay voltaje presente.

Analizando el circuito en esta primera etapa, ver figura 4.7, tenemos que:

Cuando el Transistor está encendido (conduciendo), el devanado primario del transformador actúa como un inductor que almacena energía. En esta etapa, el circuito puede modelarse como una fuente de voltaje con entrada V_{in} conectado a una inductancia L_p (del primario), a través del interruptor cerrado.

La relación voltaje-corriente para el inductor es:

$$V_L = L_p \left(\frac{di_p(t)}{dt} \right) \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

En este caso $V_L = V_{in}$, considerando al Transistor como un interruptor ideal, su voltaje Drain-Source es mínimo.

Entonces:

$$V_{in} = L_p \left(\frac{di_p(t)}{dt} \right) \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Resolviendo para la corriente:

$$\frac{di_p(t)}{dt} = \frac{V_{in}}{L_p} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Integrando ambos lados respecto al tiempo $t=0$, hasta un tiempo t :

$$i_p(t) = \int_0^t \frac{V_{in}}{L_p} dt = \frac{V_{in}}{L_p} t \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Por lo tanto, tenemos que la ecuación 4.4 define una recta de variable t y pendiente V_{in}/L_p , donde:

- $i_p(t)$: corriente en el devanado primario en función del tiempo.
- V_{in} : voltaje de entrada aplicado al primario.
- L_p : inductancia del devanado primario.
- t = tiempo durante el cual el Transistor está conduciendo.

4.1.6.2 Segunda etapa.

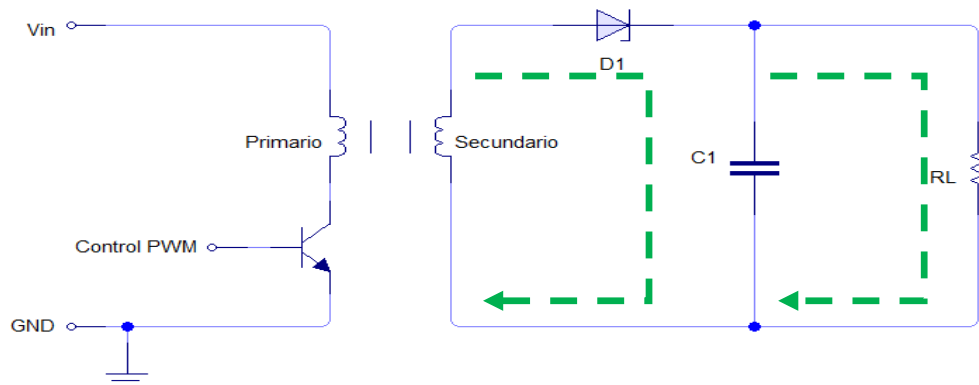


Figura 4.8. Segunda etapa, interruptor apagado

En la segunda etapa, al apagar el interruptor, el flujo de corriente en el primario disminuye, haciendo que el extremo del devanado secundario adquiera una polaridad positiva. Al igual que en la etapa de encendido anterior, la polaridad del voltaje primario también se aplica al secundario, mientras que el voltaje secundario es proporcional a la relación de vueltas de embobinados, entre el primario y el secundario. El diodo rectificador de salida continúa conduciendo y el inductor secundario del transformador suministra corriente al condensador de salida y a la carga. El capacitor pierde carga durante el ciclo de encendido, pero ahora se recarga y puede suministrar corriente a la carga RL cuando regresa la función de transistor apagado.

Analizando el Circuito de la segunda etapa.

Cuando el Transistor se apaga, el campo magnético acumulado en el transformador genera un voltaje en el devanado secundario, lo que permite la transferencia de energía hacia la carga RL. Este proceso se rige por las leyes del transformador ideal y por la ley de Faraday-Lenz.

Considerando la relación del voltaje entre el Primario y el secundario:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Donde.
 V_s , voltaje en el secundario
 V_p , voltaje en el primario
 N_s , numero de vueltas en el secundario
 N_p , numero de vueltas en el primario

Despejando V_s (voltaje inducido en el secundario):

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Donde $V_p \approx V_{in}$: voltaje que se aplicó al primario durante la conducción del Transitorio.

Entonces:

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_{in} \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Este es el voltaje instantáneo inducido en el secundario cuando el Transistor se apaga.

Calculando la corriente inducida en el secundario, que depende de la diferencia entre V_s y el voltaje de salida V_{out} , y del valor de la inductancia vista desde el lado secundario L_s

Aplicando la ley de voltaje en la rama secundaria cuando el diodo está en conducción, tenemos:

$$V_s - V_{out} = L_s \frac{di_s(t)}{dt} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Integrando se obtiene:

$$i_s(t) = \frac{V_s - V_{out}}{L_s} t + i_s(0) \quad (\text{Ecuación 4.9})$$

Donde $i_s(0)$ es la corriente al inicio de la conducción del diodo.

Por la conservación de la energía, la conducción entre el primario y el secundario, toda la energía acumulada en el núcleo durante el tiempo t_{on} se transfiere al secundario durante el tiempo t_{off} :

$$E = \int_0^{t_{off}} V_{out} * i_s(t) dt \quad (\text{Ecuación 4.10})$$

En resumen, el voltaje en el secundario al apagar el Transistor está directamente relacionado con la relación de vueltas:

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_{in} \quad (\text{Ecuación 4.11})$$

Las ventajas principales del convertidor Flyback incluyen:

- Aislamiento entre entrada y salida.
- Capacidad de regulación de voltajes mayores o menores al de entrada.
- Compatibilidad con control del lado primario (como en el FL7734), eliminando el optoacoplador.
- Eficiencia aceptable y bajo costo para aplicaciones de iluminación.

4.2 Modos de funcionamiento de las fuentes conmutadas, CCM, DCM, BCM

Las fuentes conmutadas (SMPS, Switched-Mode Power Supplies) son ampliamente utilizadas en aplicaciones electrónicas debido a su alta eficiencia, tamaño compacto y capacidad de adaptación a diferentes niveles de voltaje. A diferencia de las fuentes

lineales, que regulan la energía disipando el exceso como calor, las fuentes conmutadas almacenan temporalmente la energía en dispositivos reactivos como inductores o transformadores, y la liberan de forma controlada mediante dispositivos de conmutación como transistores MOSFET.

El comportamiento dinámico de estos circuitos depende en gran medida de cómo fluye la corriente a través del inductor o del transformador durante cada ciclo de conmutación. Esta dinámica se clasifica en diferentes modos de conducción, los cuales determinan no solo la eficiencia energética del sistema, sino también el diseño del filtro de salida, la frecuencia de operación, el control térmico y las exigencias del controlador.

A continuación, se describen los tres modos de funcionamiento más comunes en fuentes conmutadas:

- Conducción Continua (CCM)
- Conducción Discontinua (DCM)
- Modo de Conducción en el Límite O Frontera (BCM)

Cada uno presenta características particulares que los hacen más adecuados para distintas condiciones de carga, topologías de convertidor y objetivos de diseño.

4.3 Modo de Conducción Continua (CCM – Continuous Conduction Mode).

En este modo, la corriente en el inductor primario del transformador nunca cae a cero durante el ciclo de conmutación. La energía se transfiere continuamente de la fuente a la carga.

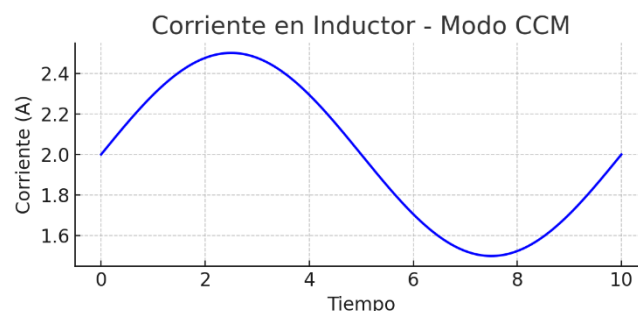


Figura 4.9 Corriente en Inductor Modo CCM, $i_L(t) > 0$ para todo t .

- Ventajas: Menor rizado, mayor eficiencia en cargas medias-altas.
- Desventajas: Requiere inductores más grandes, más pérdidas por conducción.

4.4 Modo de Conducción Discontinua (DCM – Discontinuous Conduction Mode).

La corriente en el inductor cae completamente a cero antes de que comience el siguiente ciclo. Hay un intervalo donde ningún componente conduce.

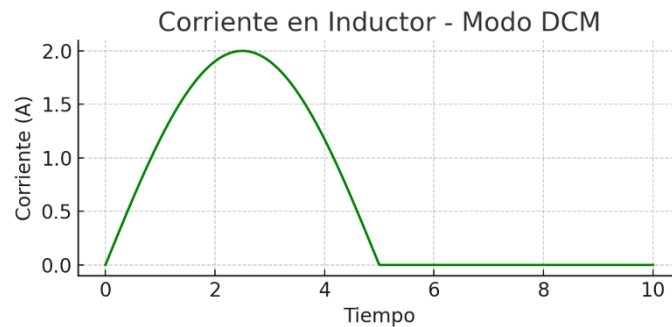


Figura 4.10 Corriente en Inductor Modo DCM, $i_L(t) = 0$ durante una parte del ciclo.

- Ventajas: Inductores más pequeños, aislación natural ante cortocircuitos.
- Desventajas: Mayor rizado, mayores pérdidas por conmutación.

4.5 Modo de Conducción en el Límite (BCM – Boundary Conduction Mode).

Modo intermedio entre CCM y DCM. El siguiente ciclo inicia exactamente cuando la corriente cae a cero.

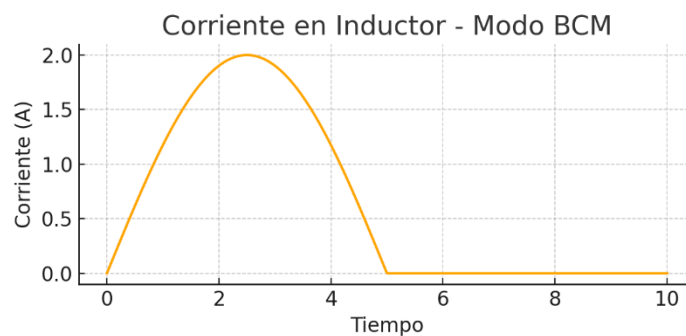


Figura 4.11 Corriente en Inductor Modo BCM, $i_L(t) \rightarrow 0$ al final del ciclo.

- Ventajas: Sin tiempo muerto, eficiencia aceptable y menor tamaño.
- Desventajas: Requiere control más sofisticado, frecuencia variable.

4.6 Las fuentes conmutadas y el factor de potencia.

En aplicaciones modernas de iluminación, no solo se busca eficiencia en la conversión de energía, sino también una buena calidad de potencia. Las fuentes conmutadas, si no son diseñadas adecuadamente, pueden introducir distorsión armónica en la red eléctrica debido a su naturaleza no lineal. Esta distorsión reduce el factor de potencia (FP), lo que implica una mayor demanda de corriente reactiva y una menor eficiencia global del sistema.

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa (utilizada para realizar trabajo útil) y la potencia aparente (total suministrada por la red). Un FP bajo implica un mal aprovechamiento de la energía, mayor caída de tensión en las líneas y mayores costos operativos.

Por ello, muchos drivers modernos para LEDs incorporan corrección del factor de potencia (PFC), ya sea en forma pasiva o activa:

- PFC pasivo: emplea elementos como inductores y capacitores para filtrar los armónicos de corriente. Es simple, confiable y económico, pero su rendimiento es limitado y depende de la frecuencia de operación.
- PFC activo: utiliza circuitos de conmutación controlada para hacer que la corriente de entrada siga una forma senoidal en fase con la tensión. Mejora considerablemente el FP, acercándolo a 0.99, y cumple con normativas internacionales como IEC 61000-3-2.

La corrección del FP no solo permite cumplir con estas normativas, sino que también mejora la eficiencia energética global del sistema, reduce el calentamiento de cables, mejora la vida útil de los componentes y disminuye la emisión de interferencias electromagnéticas.

4.7 Fabricantes de drivers para LEDs. Algunos ejemplos.

En el mercado existen diversas compañías especializadas en la fabricación de drivers para iluminación LED, tanto para aplicaciones industriales como comerciales y residenciales. Estos fabricantes ofrecen soluciones con distintos grados de sofisticación, niveles de

protección y funciones de control inteligente. Algunos de los fabricantes más reconocidos incluyen:

- Mean Well ^[21]: ofrece drivers con una amplia gama de potencias, voltajes de salida y funcionalidades avanzadas como atenuación 0-10V, DALI ^[22] y protecciones térmicas. Sus productos son ampliamente utilizados por su confiabilidad y buena relación calidad-precio.

Ejemplos:

- HLG Series: Drivers IP67, CC+CV, potencia de 40–600 W, control 3-en-1/DALI y protección PFC activa.
 - IDLC-45A-X: Driver CC 45 W con PFC y atenuación 2-en-1, diseñado para iluminación sin parpadeo.
- Philips (Signify) ^[23]: desarrolla soluciones de iluminación LED con énfasis en la eficiencia y el control inteligente mediante conectividad IoT. Sus drivers permiten integrar la iluminación con sistemas de automatización de edificios.

Ejemplos:

- Advance Xitanium SR: Drivers programables, conexión inalámbrica y sensor-ready para iluminación conectada.
 - Xitanium 40 W 0.70 A Prog+ GL-J sXt: Driver programable para usos industriales exteriores/inferiores
- Inventronics ^[24]: especializada en drivers para uso industrial y aplicaciones en exteriores, con alto grado de protección (IP67 ^[25]) y características de control mediante protocolos digitales.

21 Mean Well, Fabricante Norteamericano de fuentes conmutadas

22 0-10V, DALI, estándares y sistemas de control de atenuación

23 Philips (Signify), Empresa de países bajos lider en productos de iluminación

24 Inventronics. Fabricante de fuentes para iluminación

25 IP67, Normas IP describen el grado de protección de productos aplicados a la intemperie, IP20 es solo interiores, IP67 es grado sumergible.

Ejemplos:

- EUM-150SxxxDG: Driver CC de 150 W, IP66/67, dimmable (1-10 V, PWM, DALI), protección completa y garantía de 5 años.
 - EUC-042S175PS: Driver programable, pensado para iluminación exterior e industrial.
- Osram [26]: ofrece soluciones completas para sistemas de iluminación arquitectónica e industrial, incluyendo drivers con interfaces estándares como DALI, PWM y Zigbee.

Ejemplos:

- AS1112: Circuito integrado driver LED – 16 canales, PWM de 12 bits, interfaz SPI, detección de LED abierto/cortocircuito.
 - Optotronic OT40/50/60: Drivers programables de 40–60 W CC, 120–277 V AC, corriente ajustable 700–1400 mA, dimming 0–10 V.
- Tridonic [27]: destaca por su enfoque en eficiencia energética y compatibilidad con sistemas de gestión de edificios inteligentes. Ofrece productos modulares y fácilmente integrables.

Ejemplos:

- 34 W LED Driver 87500862: CC, dimmable 0–10 V, corriente ajustable (690/825 mA), 50 000 h de vida y protecciones integradas.
- LC 25/200-350/70 flexCC y LC 120/350-1050/230 o4a NF h16 EXC4: Drivers CC incorporables, protectores térmicos y EMI integrados

Estos fabricantes publican hojas de datos y catálogos con información técnica detallada, como curvas de eficiencia, tolerancias térmicas, diagramas de conexión, condiciones de montaje y recomendaciones de protección, que permiten seleccionar el driver más adecuado según los requerimientos específicos del proyecto.

26 Osram. Empresa Alemana lider en productos de iluminación

27 Tridonic, Fabricante de productos de iluminación

4.8 Selección del driver a implementar.

La selección de un driver LED adecuado depende de varios factores técnicos y funcionales, que deben analizarse cuidadosamente para asegurar el rendimiento y la durabilidad del sistema, además de cumplir con la normatividad aplicable:

- Tensión y corriente de salida requeridas: deben ser compatibles con el arreglo de LEDs utilizado. Un desajuste puede afectar la iluminación o dañar los componentes.
- Tipo de regulación: los LEDs requieren corriente constante (CC) para mantener una iluminación estable y prolongar su vida útil. Algunos drivers ofrecen salida en tensión constante (CV), adecuada solo para ciertos tipos de módulos LED.
- Compatibilidad con atenuación (dimming): según la aplicación, puede requerirse control de brillo mediante señales analógicas (0-10V), modulación por ancho de pulso (PWM) o protocolos digitales (DALI, DMX, etc.).
- Eficiencia energética: se busca reducir pérdidas por conmutación, mejorar la disipación térmica y aprovechar más eficazmente la energía disponible.
- Condiciones ambientales: deben considerarse el rango de temperatura de operación, la humedad relativa, el nivel de protección IP, y la resistencia a vibraciones o contaminantes.
- Integración con sistemas inteligentes: para proyectos modernos se valora la capacidad de comunicación con otros dispositivos o plataformas de control mediante interfaces estandarizadas.

En el presente proyecto se considera el driver FL7734, un driver tipo fuente conmutada con salida de corriente constante, capacidad de atenuación mediante control a dos hilos, y con un circuito de acuerdo con las especificaciones técnicas requeridas para el LED COB. En el siguiente capítulo documentamos este driver.

Este análisis garantiza una operación eficiente, estable y compatible con los criterios de diseño sustentable propuestos en el marco de la iluminación moderna. Además, permite asegurar la compatibilidad electromagnética, minimizar las pérdidas energéticas y facilitar la integración con sistemas de automatización o control de iluminación.

CAPITULO V

Implementación del controlador DLA2H

5.1 Especificaciones del driver.

En este capítulo se describe la implementación del controlador de tipo Wide Input/Output Buck-Boost, basado en el uso del circuito integrado FL7734, originalmente desarrollado por Fairchild Semiconductor (actualmente parte de **Infineon** Technologies). Este dispositivo ha sido seleccionado por su capacidad de controlar de forma eficiente fuentes conmutadas para iluminación LED, cumpliendo con diversas normativas internacionales y ofreciendo soporte para atenuación mediante múltiples técnicas, incluyendo corte de fase.

A lo largo de este capítulo se presentan las especificaciones técnicas del driver, su funcionamiento, ventajas operativas, consideraciones normativas relevantes, así como el flujo general del diseño aplicado a esta solución.

5.1.1 FL7734 y la Normatividad para productos de Iluminación.

El FL7734 está diseñado para cumplir con regulaciones internacionales de eficiencia energética como:

- Energy Star.
- IEC61000-3-2 Clase C para control de distorsión armónica.
- Normativas EMC (compatibilidad electromagnética).
- THD < 20% en cargas superiores al 50%.

El controlador opera en modo de conducción discontinua (DCM) con modulación de frecuencia variable, permitiendo un alto factor de potencia ($PF > 0.9$) y bajo contenido armónico, lo cual es obligatorio en muchas normativas de productos LED.

5.1.2 Soluciones para sistemas de Iluminación con atenuación, tipos.

Los sistemas de iluminación con atenuación (dimming) han evolucionado significativamente en los últimos años gracias al desarrollo de tecnologías de control electrónico, protocolos digitales y drivers especializados para LEDs. La atenuación no solo permite ajustar la intensidad luminosa, sino que también contribuye al ahorro energético, al confort visual, a la protección de los LEDs y a la integración con sistemas

inteligentes de automatización. A continuación, se describen las principales soluciones de atenuación empleadas en sistemas de iluminación modernos.

5.1.2.1 Atenuación por corte de fase (Phase-Cut Dimming)

Este método es uno de los más utilizados en entornos residenciales y comerciales debido a su simplicidad y compatibilidad con instalaciones eléctricas existentes. Consiste en modificar la forma de onda de la tensión de alimentación mediante el recorte de la fase.

Tipos:

Leading Edge : Comúnmente con Triac:

- Muy común en dimmers tradicionales. Recorte frontal de la onda
- Compatible con luminarias incandescentes y algunos drivers LED diseñados para TRIAC.
- Bajo costo, pero menor precisión y riesgo de parpadeo si el driver no está optimizado.

Trailing Edge: Comúnmente usa un MOSFET:

- Recorte en la parte final de la onda.
- Más estable y silencioso.
- Mejor compatibilidad con drivers LED modernos.

Ventajas: fácil instalación, no requiere cableado adicional. Desventajas: depende del tipo de driver, posibilidad de parpadeo.

5.1.2.2 Atenuación por señal analógica (0–10 V / 1–10 V)

Este sistema utiliza una señal analógica de bajo voltaje para controlar el nivel de salida del driver LED.

- 0–10 V: la luz se apaga a 0 V.
- 1–10 V: la luz no se apaga completamente; mantiene un nivel mínimo.

Características:

- Control simple y confiable.

- Muy usado en aplicaciones industriales, comercios y oficinas.
- Permite controlar múltiples luminarias desde un solo dimmer.

Ventajas: inmunidad al ruido, estabilidad, bajo costo. Desventajas: requiere cableado adicional para la señal de control.

5.1.2.3 Atenuación por modulación por ancho de pulso (PWM)

En la atenuación por PWM, la luminosidad del LED se ajusta según el ciclo de trabajo de una señal digital.

Características:

- Permite un control preciso sin alterar el color.
- Ideal para tiras LED, luminarias arquitectónicas y aplicaciones donde la fidelidad cromática es importante.
- Evita variaciones en la temperatura de color.

Ventajas: muy eficiente y precisa. Desventajas: puede generar interferencias si no se filtra adecuadamente.

5.1.2.4 Atenuación digital mediante protocolo DALI (Digital Addressable Lighting Interface)

DALI es un protocolo de comunicación estandarizado para el control de sistemas de iluminación inteligentes.

Características:

- Control bidireccional.
- Permite dirigir órdenes a luminarias individuales o grupos.
- Compatible con drivers LED DALI y DALI-2.
- Integración con sistemas de automatización en edificios (BMS).

Ventajas: alta flexibilidad, programación avanzada, diagnóstico integrado. Desventajas: requiere controladores y cableado específico.

5.1.2.5 Sistemas inalámbricos de atenuación

Con el crecimiento del IoT, la iluminación inalámbrica se ha vuelto cada vez más común.

Protocolos comunes:

- Zigbee (Philips Hue, IKEA Tradfri)
- Bluetooth Mesh
- Wi-Fi
- LoRaWAN (aplicaciones de largo alcance)

Ventajas: instalación sin cableado adicional, configuración remota, integración con asistentes inteligentes. Desventajas: depende de compatibilidad de protocolos en los enlaces, posible interferencia electromagnética.

5.1.2.6 Atenuación por control a dos hilos (Two-Wire Dimming)

Este tipo de atenuación se emplea principalmente en sistemas donde se desea simplicidad de instalación y compatibilidad con atenuadores tradicionales.

Características:

- Se utiliza la misma línea de alimentación para transmitir la información de atenuación.
- Muy útil en sistemas LED diseñados para reemplazar luminarias existentes.
- Requiere drivers especiales capaces de interpretar variaciones en la tensión o frecuencia.

Aplicaciones:

- Alumbrado residencial.
- Sustitución de sistemas incandescentes por LEDS.
- Proyectos de eficiencia energética.

5.1.3 El FL7734 tipos de atenuaciones y características generales.

El FL7734 admite varios métodos de atenuación:

- Atenuación de línea (TRIAC): Compatible con dimmers de borde de entrada (leading edge) y borde de salida (trailing edge).
- Atenuación 0-10V: Mediante circuitos adicionales.
- Atenuación PWM: A través de modulación de señal externa, posible adaptando el diseño.
- Atenuación por control de fase: Internamente maneja perfil de carga ajustado para este tipo de Dimmers.

Estas opciones hacen al FL7734 muy flexible para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, donde se requiere compatibilidad con dimmers estándar y sistemas más sofisticados.

El FL7734 es un controlador primario para LED que integra funciones como:

- Arranque rápido sin resistencias de alta potencia.
- Control de voltaje/corriente de salida constante con compensación interna.
- Integración de rectificación activa y control de encendido suave.
- Amplia variación de red desde 90 V a 277 V RMS.
- Soporte para operación en convertidores flyback con acoplamiento magnético (transformador).

Es ideal para fuentes conmutadas LED con potencia entre 5W y 40 W, puede escalarse según el diseño.

5.1.4 FL7734 Especificaciones Técnicas generales

El FL7734, es un controlador convertidor DC/DC de una sola etapa, con regulación del lado del primario del transformador de salida, controla por PWM, para iluminación con LEDS, regulable con atenuadores por corte de fase (ver apartado 5.1.2)

En esta sección del documento hacemos un resumen de lo más importante que se expresa en la Hoja de Especificaciones del FL7734.

Es un controlador de fuente conmutada por Modulación de Ancho de Pulso (PWM) altamente integrado con una técnica avanzada de Regulación del Lado Primario (PSR) del transformador de la fuente, desarrollado para minimizar los componentes en soluciones de iluminación con LED de baja y media potencia. Utiliza una innovadora tecnología (TRUECURRENT) para un excelente control de Corriente Constante (CC), alcanza un control de menos del $\pm 1\%$ en un amplio rango de voltaje de línea eléctrica para cumplir con los estrictos requisitos de especificaciones de los LED.

El FL7734 puede funcionar con todo tipo de atenuadores de corte de fase (dimmer). La atenuación por corte de fase se gestiona suavemente mediante el control de inyección de corriente para lograr una excelente compatibilidad con el atenuador sin parpadeo. El controlador detecta automáticamente si hay una conexión con atenuador.

En el modo sin atenuación, el funcionamiento está configurado para optimizar el factor de potencia (FP) y la distorsión de armónicas (THD); al habilitar el control de frecuencia lineal y el control de voltaje/corriente basado en Modo de Conducción Discontinua (DCM).

Se utiliza un circuito de inyección externo de alto voltaje para implementar un arranque rápido y una alta eficiencia del sistema.

El FL7734 también proporciona protecciones, como LED abierto/cortocircuito, resistencia de detección en cortocircuito y sobre temperatura, para una alta confiabilidad del sistema.

El FL7734 está disponible en paquete de contorno pequeño (SOP) de 16 terminales.

5.1.4.1 Características técnicas de sistemas internos

- Excelente compatibilidad con atenuadores, utiliza control de atenuación activo.
- Curva de atenuación programable y gestión de corriente de entrada para evitar parpadeo.
- Regulación de corriente LED constante en un amplio rango de ángulo de fase.
- Solución optimizada para evitar condensador de entrada, ni necesidad de circuitos externos de retroalimentación.

- Control preciso de corriente constante (CC), independiente del voltaje de línea, voltaje de salida y variación de la inductancia magnetizante del transformador de salida.
- Corrección del factor de potencia (PFC).
- Inicio rápido utilizando circuito de inyección de corriente.
- Protección LEDs abiertos.
- Protección LED en corto.
- Protección contra cortocircuitos de la resistencia de detección.
- Limitación de corriente ciclo por ciclo.
- Protección contra sobrecalentamiento con reinicio automático.

La figura 5.1 muestra la aplicación típica propuesta por el fabricante.

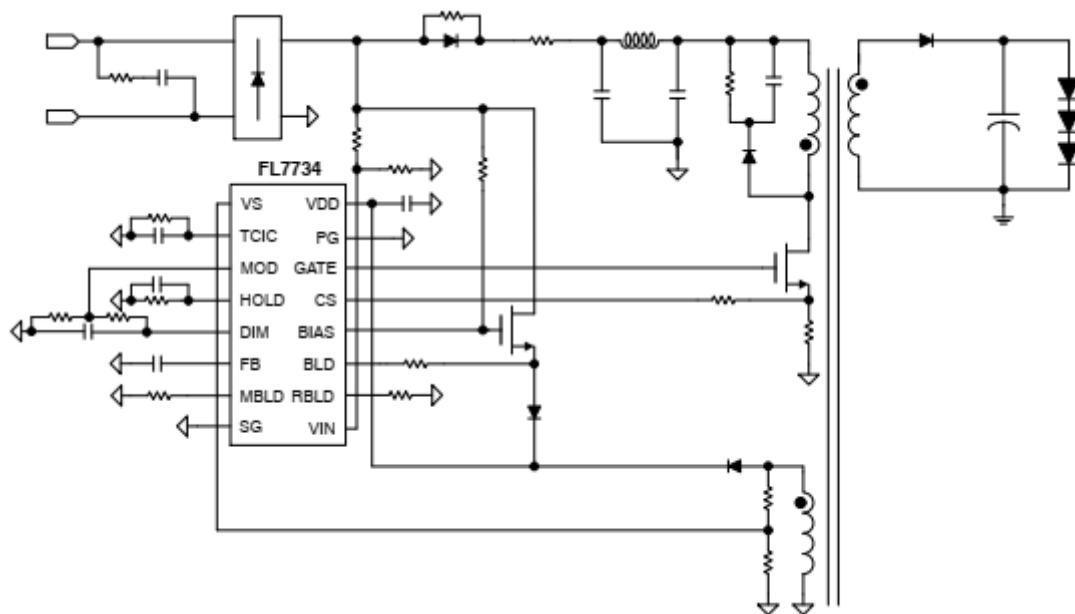


Figura 5.1 Diagrama típico de aplicación

El diagrama de bloques contenidos en el FL7734 se muestra en la figura 5.2

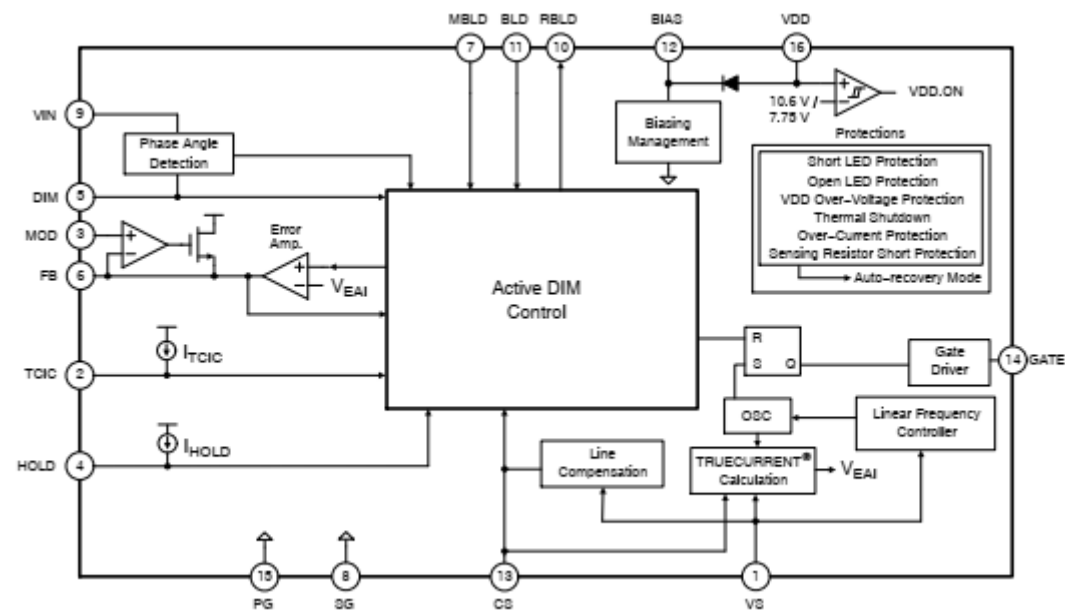


Figura 5.2 Diagrama de bloques funcionales del FL7734

Disposición de terminales en el encapsulado SOP 16, se muestra en la figura 5.3

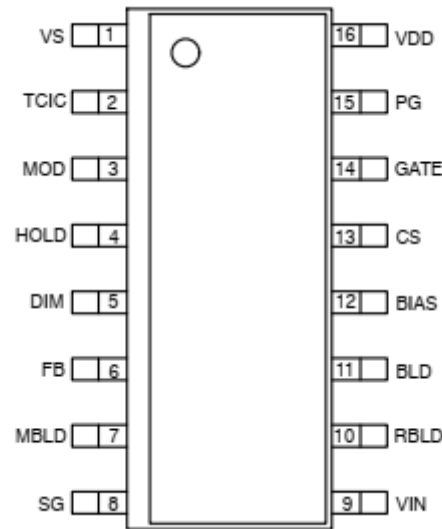


Figura 5.3 Configuración de terminales del FL7734

Descripción de funciones de las terminales del FL7734, tabla 5.1

Terminal	Símbolo	Descripción
1	VS	Sensor de Voltaje. La terminal VS detecta el voltaje de salida para el control de frecuencia lineal y tiempo de descarga, para la regulación de la corriente de salida. La detección de voltaje VS protege el sistema a condiciones de LED en circuito abierto o en corto.
2	TCIC	Corriente de entrada constante. TCIC gestiona el control del modo de conmutación.
3	MOD	Modulación de la realimentación (FB). Esta Terminal fija la realimentación mínima al Integrado.
4	HOLD	La resistencia externa en la terminal HOLD, establece el nivel de corriente de entrada constante.
5	DIM	Sensor del ángulo de fase donde está el atenuador. El voltaje en esta terminal indica el ángulo de fase. Este voltaje es referencia del amplificador de error en el circuito de retroalimentación.
6	FB	Realimentación, FB es la salida del amplificador de error.
7	MBLD	La resistencia conectada a MBLD determina la inyección de corriente máxima actual.
8	SG	Referencia de tierra de las señales de control.
9	VIN	Sensor de voltaje de entrada. La terminal VIN detecta el voltaje de entrada para determinar el ángulo de fase.
10	RBLD	Resistencia de control de inyección de corriente. La corriente en RBLD establecida por una resistencia externa decide la cantidad de corriente de inyección para evitar parpadeo.
11	BLD	Control de inyección de corriente. De BLD fluye corriente hacia RBLD
12	BIAS	BIAS polariza el circuito de inyección. El mosfet externo está controlado por una referencia interna. El circuito fija el nivel de RBLD.
13	CS	Sensor de la corriente de LEDs. Una resistencia de detección de corriente en esta terminal es para detectar la corriente del MOSFET, para la regulación de la corriente de salida, la protección y detección de sobre corriente, la protección contra cortocircuitos de resistencia se activa con esta terminal también.
14	GATE	Salida de señal PWM. Controlador del GATE que conmuta el MOSFET del primario del transformador de alimentación a los LEDs.
15	PG	Tierra o referencia de potencia.
16	VDD	Fuente de alimentación. Se conecta a un condensador de desacoplamiento. Polarización del integrado y suministra la corriente de conducción del MOSFET.

Tabla 5.1 Descriptiva de las terminales del FL7734

5.1.5 Descripción funcional del sistema implementado en el FL7734

Es un controlador por ancho de pulso (PWM) regulable por corte de fase para aplicaciones de iluminación con LEDs. La regulación de corriente LED es precisa e independiente del voltaje de entrada, voltaje de salida y de las variaciones de la inductancia magnetizante del primario del transformador de potencia, implementa una técnica denominada TRUECURRENT. Una de las características del controlador es la aplicación de una curva de atenuación programable que garantiza que la corriente máxima constante del LED se puede alcanzar en los distintos ángulos de fase del atenuador y también en baja corriente del LED, se puede configurar el ángulo de fase mínimo, además condición con amplio rango de atenuación. Esta técnica propiedad de ONSEMI, el control constante de la corriente de entrada proporciona una excelente atenuación y compatibilidad con atenuadores, manteniendo la corriente de entrada superior a la corriente de retención del TRIAC y mantiene su conducción evitando el parpadeo de los LEDs. El control de frecuencia lineal y operación en Modo de Conducción Discontinuo (DCM) con control del tiempo de encendido minimizada alcanza el mejor factor de potencia y minimiza la Distorsión de Armónicas (THD) en una sola etapa. La topología implementa una variedad de protecciones; como LEDs en corto, LEDs abiertos; en resistencia de sensor una protección abierta y/o cortocircuito; protección contra sobretensión y una limitación de corriente ciclo por ciclo estabiliza TODO el sistema y protege los componentes externos.

5.1.6 Procedimiento de encendido

Se utiliza un MOSFET de inyección externa para un inicio rápido. Una vez que se enciende la energía, el voltaje de línea eléctrica, el voltaje en la terminal BIAS se eleva rápidamente a $V_{BIASVDD-OFF}$ (24.4 V) para que el MOSFET de inyección cargue el condensador en la terminal VDD por arriba del voltaje V_{DD-ON} (10.6 V). Una vez que VDD sea superior a V_{DD-ON} , se iniciará la secuencia (SS1) mostrada en la figura 5.4, comienza con la corriente de inyección máxima para estabilizar el funcionamiento del atenuador. SS1 finaliza cuando el VIN alcanza el cruce por cero de voltaje de línea después de $t_{SS1-MIN}$ (12mS).

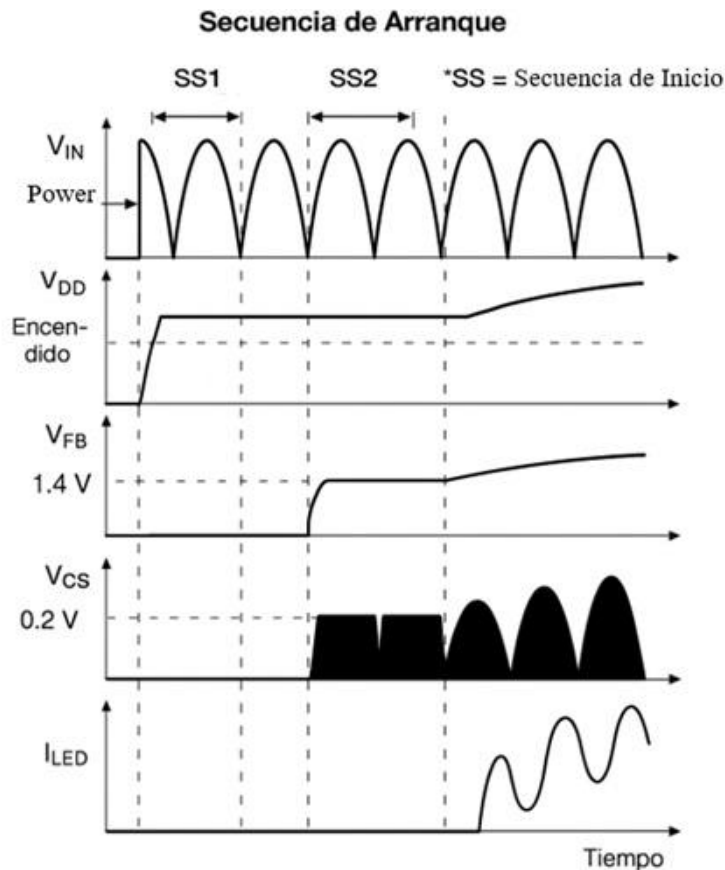


Figura 5.4 Secuencia de encendido del FL7734

Durante SS2, que se define como un período de la línea eléctrica, el FL7734 determina si el atenuador de corte de fase está conectado en la entrada. A partir de SS3, el funcionamiento interno se configura como modo atenuación o modo sin atenuación. El tiempo SS3 está establecido en más de $t_{SS3-MIN}$, que se cuenta exceptuando el tiempo de corte de fase y para terminar la sincronización con cruce por cero de V_{IN} con una referencia de 0.2 volts, el modo de corriente se activa durante SS3 para que el voltaje de salida alcance un nivel superior al umbral para la protección de LEDs en corto, la cual se habilita después de SS3. Mientras tanto, el voltaje en la terminal FB se fija a 1.4 V en modo sin atenuación o/a cierto nivel proporcional al ángulo de fase en el modo con atenuación para ajustar el voltaje más cerca del nivel de estado estable. La corriente de inyección máxima se desactiva después de SS3 y el modo de funcionamiento se determina como: El control habilitado en modo sin atenuación y entrada constante o el control está habilitado en el modo de atenuación.

5.1.7 Regulación de corriente constante

La corriente de salida del FL7734 se determina utilizando la corriente pico del inductor y el tiempo de descarga de la misma corriente del inductor, porque la corriente de la salida es la misma que el promedio de la corriente del diodo de recuperación en estado estacionario. El valor máximo de la corriente del inductor de primario es determinado por el nivel de voltaje en la terminal del sensor CS. El tiempo de descarga del inductor (**tdis**) es detectado por un subcircuito denominado **tdis** utilizando tres fuentes de información: corriente máxima de inductor, tiempo de descarga del inductor y período de conmutación de funcionamiento, el bloque TRUECURRENT calcula la corriente de salida estimada. La salida del cálculo se compara con un valor referencia interno preciso para generar un voltaje de error (VFB). Esta técnica innovadora de ONSEMI, TRUECURRENT, genera una corriente constante en LEDs con precisión.

5.1.8 Control de corriente de entrada constante

Un control de la corriente de entrada al convertidor, patentado por ONSEMI, denominado como: Corriente de entrada constante (CIC), genera una función de conmutación para formar la corriente de entrada proporcional al valor fijado en la resistencia externa de la terminal HOLD. La corriente de entrada a este sistema CIC es filtrada y junto con la señal en la terminal VIN se ajusta la función mediante el cálculo del promedio del voltaje en la terminal CS. La corriente de entrada está determinada por la ecuación 5.1, donde K_{HOLD} es un coeficiente de cálculo interno.

$$I_{IN} = \frac{R_{HOLD}}{R_{CS} * K_{HOLD}} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

El control CIC de ONSEMI ofrece una gestión de precisión y estabilidad de corriente superior a otras tecnologías de control de corriente de entrada.

5.1.9 Control de atenuación (dimming)

De acuerdo a la figura 5.5. El ángulo de fase del dimmer de entrada se detecta comparando el voltaje en la terminal VIN y 3V denominado voltaje de umbral (V_{VIN-DIM}). Cuando el voltaje VIN es superior a 3V, la corriente de suministro DIM (I_{DIM}) se conecta a la terminal DIM, la corriente fluye hacia las resistencias externas (R_{DIM1} y R_{DIM2}) y al condensador (C_{DIM}) y por lo tanto, el voltaje DIM filtrado por C_{DIM} indica el ángulo

de fase controlado por el atenuador o dimmer de corte de fase en la entrada del sistema, de acuerdo con la ecuación 5.2.

$$V_{DIM} = I_{DIM} * (R_{DIM1} + R_{DIM2}) * \frac{PA}{180^\circ} \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

PA es el ángulo de fase detectado (Phase Angle)

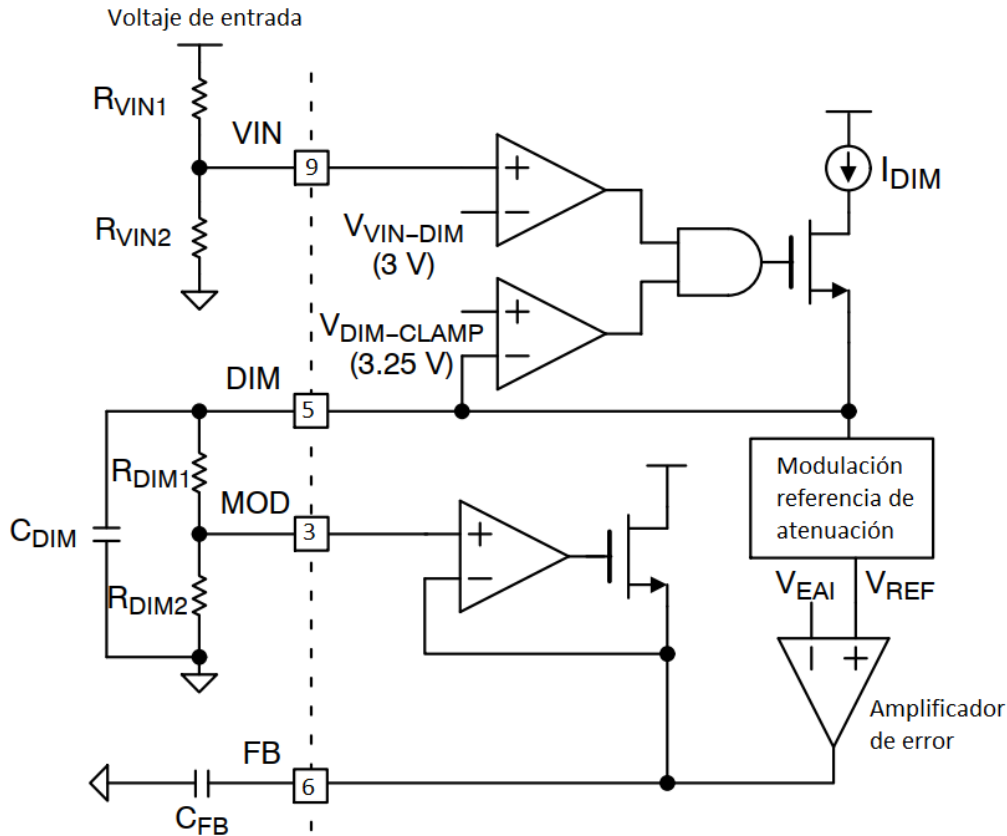


Figura 5.5 Control de Atenuación.

La función de la modulación de referencia de atenuación, que se muestra en Figura 5.5, la corriente de salida se regula constantemente con V_{REF} constante, cuando V_{DIM} es superior a 3V y V_{REF} está configurado a su valor inferior V_{EAI} (resultado del cálculo de $TRUECURRENT$). Cuando V_{DIM} es inferior a 2.25 V el amplificador de error reduce la corriente en la salida y el voltaje en FB se fija en MOD para que el control de lazo abierto comience un control de corriente de LEDs estable a bajo rango de ángulo de fase.

La alta compatibilidad con diversos atenuadores se logra mediante la inyección de corriente a través de BLD a RBLD y la gestión del modo de conmutación por parte de TCIC.

5.1.10 Factor de Potencia (PF) y distorsión de armónicas (THD)

En un convertidor BOOST convencional, la conducción límite se utiliza generalmente con el modo de Conducción en la Frontera (BCM) para mantener la corriente de entrada en fase y por tanto tener un alto Factor de Potencia (PF) y minimizar la Distorsión Total de Armónicas (THD). Sin embargo, para convertidores FLYBACK/BUCK-BOOST de una sola etapa, BCM distorsiona la corriente de entrada porque la corriente del inductor de potencia no es la misma que la corriente de entrada, resulta por tanto en no cumplir el alto PF y baja THD, en este caso se hace necesario agregar una corriente con una carga pasiva (resistencia y condensador en la entrada del controlador) para disparar exitosamente en el modo de etapa sencilla al TRIAC.

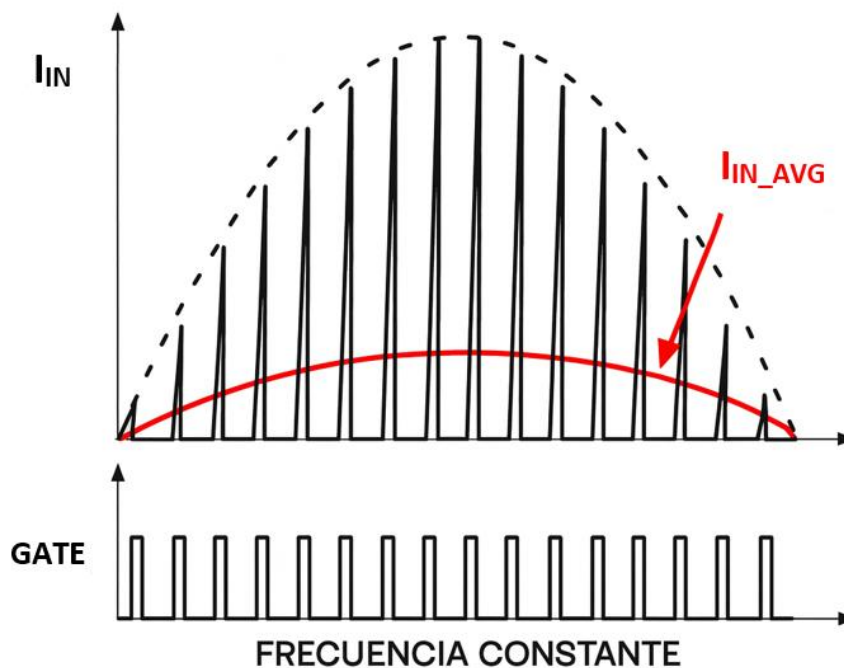


Figura 5.6 Control del Factor de Potencia en el modo sin atenuador.

Para optimizar el factor de potencia (PF) y la distorsión armónica total (THD) en la topología flyback de una sola etapa, el tiempo de encendido constante y la frecuencia constante en el modo de conducción discontinua (DCM) son el mejor método para hacer que la corriente de entrada sea proporcional al voltaje de entrada, como se muestra en la Figura 5.6 anterior. El FL7734 adopta básicamente la operación DCM con encendido y frecuencia constantes en cada medio ciclo de línea. Una vez que se detecta la ausencia del atenuador durante la secuencia de arranque, el FL7734 selecciona el modo de voltaje

en el que el tiempo de encendido constante se mantiene mediante un amplificador de error interno y un condensador externo grande (típicamente $>1 \mu\text{F}$) en la terminal FB. La frecuencia constante y el funcionamiento DCM se gestionan mediante control de frecuencia lineal.

5.1.11 Control de frecuencia lineal.

El funcionamiento en DCM debe garantizarse para un alto factor de potencia en la topología flyback. Para mantener el DCM en el amplio rango de voltaje de salida, la frecuencia se ajusta linealmente mediante el voltaje de salida en el control de frecuencia lineal. El voltaje de salida se detecta mediante el devanado auxiliar y el divisor resistivo conectado a la terminal VS, como se muestra en la Figura 5.7. Cuando el voltaje de salida disminuye, el tiempo de conducción del diodo secundario aumenta y el control de frecuencia lineal alarga el período de conmutación, lo que mantiene el funcionamiento del DCM en el amplio rango de voltaje de salida. El control de frecuencia reduce la corriente RMS del primario para una mejor eficiencia energética en condiciones de plena carga.

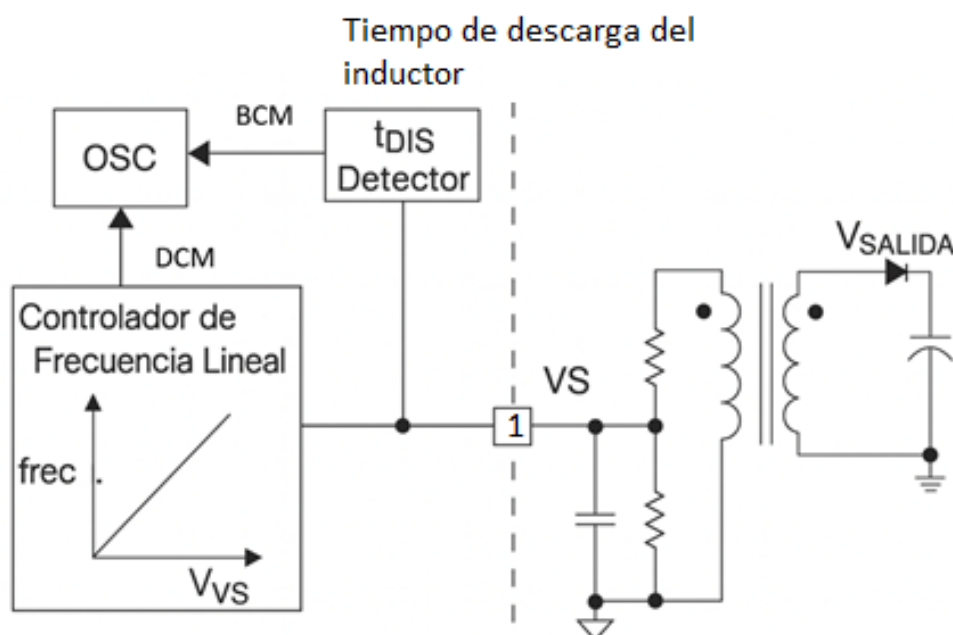


Figura 5.7 Control lineal de la frecuencia

5.1.12 Control para modo de funcionamiento en la frontera de conducción (BCM)

El final del tiempo de conducción del diodo secundario (DIS) puede superar a un período de conmutación establecido por el control de frecuencia lineal. En este caso, el FL7734 no permite Modo de Conducción Continua (CCM) ni cambios de modo de operación de DCM a BCM. Para agregar BCM al funcionamiento del controlador se puede diseñar la inductancia magnetizante (inductancia del primario del transformador de potencia) a valores superiores, logrando una mejor eficiencia; sacrificando el factor de potencia (PF) y la distorsión armónica total (THD); balance entre funcionamiento y siempre que PF y THD cuenten en las especificaciones con un margen suficiente.

5.1.13 Protección contra cortocircuito en LEDs

En una condición de cortocircuito a la salida, en los LEDs, el MOSFET principal de conmutación y el diodo secundario se ven afectados por una alta corriente.

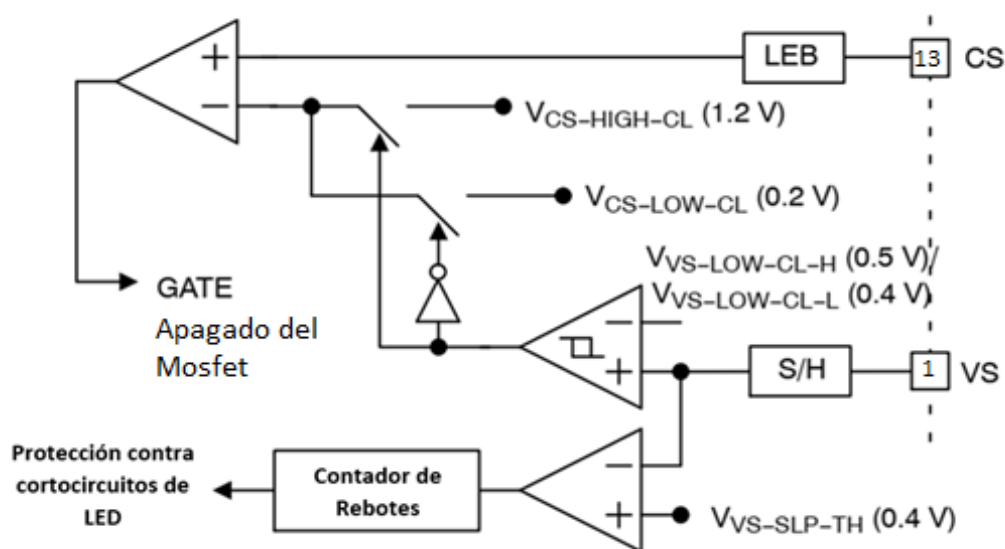


Figura 5.8 Circuito de protección a corto circuito en LEDs

El FL7734 cambia el nivel límite de corriente de salida en una condición de cortocircuito de LEDs cuando el voltaje VS muestreado es inferior a $V_{VS-LOW-CL-L}$ (0.4 V), el nivel del límite de corriente se reduce a 0.2 V desde 1.2 V, como se muestra en la Figura 5.8, de modo que se limita la alimentación y se reduce corriente en los componentes externos. Cuando el voltaje VS muestreado es continuamente inferior a $V_{VS-SLP-TH}$ (0.4 V) durante 3 ciclos de conmutación consecutivos, la protección contra cortocircuito de LEDs se activa con el apagado del Mosfet de conmutación. **Nota:** Después de que se activan

todos los tipos de protección, incluida la protección contra cortocircuito de LEDs, el FL7734 cuenta internamente 4 segundos para el reinicio automático y comienza la secuencia de arranque de nuevo.

5.1.14 Protección de LEDs abiertos.

Cuando la carga de salida, LEDs, está abierta, presenta una alta impedancia, el condensador de salida debe protegerse limitando su voltaje a un valor menor de su nominal máximo. El FL7734 detecta la condición de sobretensión de salida a través de los voltajes VDD y VS. Cuando el voltaje VDD es mayor que VDD-OVP (27 V típico) o el voltaje VS muestreado es mayor que VVS-OVP (3 V típico), se activa la protección. El modo de protección es de reinicio automático, por lo que el funcionamiento normal se reanuda cuando se elimina la condición de falla.

5.1.15 Protección contra cortocircuito de la resistencia de sensor RS.

Durante SS3, como se muestra en la figura 5.9, el controlador funciona en control de modo de corriente y el voltaje pico CS es de 0.2 V durante este modo de conmutación. Cuando la resistencia de sensor está en cortocircuito, el voltaje CS no puede alcanzar 0.2 V y el tiempo de encendido se maximiza con posible daño del MOSFET de conmutación. Para proporcionar protección contra esta falla, el FL7734 compara el voltaje CS con VCS-SRSP (0.1 V) durante los dos períodos de conmutación iniciales. Cuando VCS no alcanza 0.1 V para los dos al conmutar, se activa la protección contra cortocircuitos de la resistencia de sensor (SRSP). En condiciones normales, el voltaje de entrada correspondiente a 1.5 V en VVIN es lo suficientemente alto como para hacer que los VC sean superiores a 0.1 V con un tiempo de encendido más corto que el tiempo de encendido máximo.

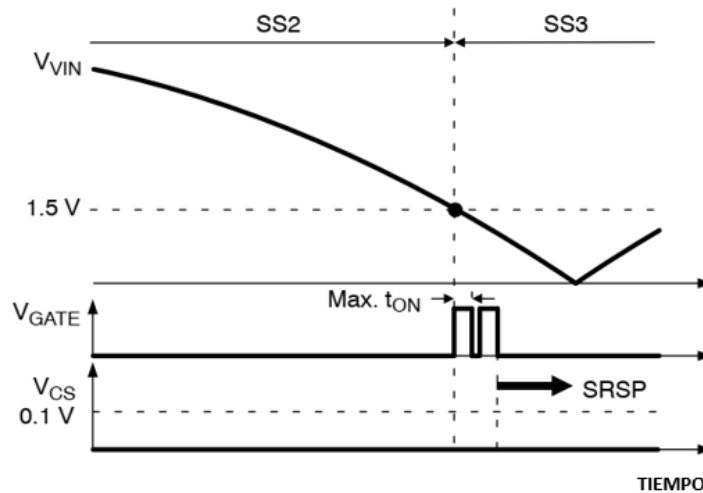


Figura 5.9 Protección a corto circuito de la resistencia sensor.

5.1.16 Bloqueo o protección por bajo voltaje de la polarización VDD, (UVLO)

Los umbrales de encendido y apagado están fijados internamente en 10.6 V y 7.75 V, respectivamente. Durante el arranque, el condensador en VDD debe cargarse a más de 10.6 V a través del MOSFET de inyección externo. Este MOSFET suministra una corriente de funcionamiento a VDD hasta que se pueda suministrar energía desde el devanado auxiliar del transformador principal. Generalmente, en un rango de ángulo de fase pequeño, el tiempo de suministro de VDD desde el devanado auxiliar es corto y VDD podría alcanzar VDD-OFF (7.75 V). Si VDD cae por debajo de VDD-OFF, se produce una interrupción de VDD con una cierta frecuencia de interrupción determinada por el valor del condensador VDD y la corriente de suministro VDD desde el devanado auxiliar. Este modo de interrupción podría causar parpadeo de LEDs. Para eliminar el modo de funcionamiento inestable, el circuito de inyección externo no permite que el voltaje VDD caiga por debajo de VDD-OFF (7.75 V) una vez que se suministra la alimentación de entrada.

5.1.17 Protección contra sobretemperatura (OTP)

El circuito de detección de temperatura integrado en el FL7734 apaga la salida PWM si la temperatura de la unión supera los 150 °C. Después de que se activa la protección contra sobretemperatura (OTP), el FL7734 repite el conteo del tiempo de reinicio automático hasta que la temperatura de la unión desciende por debajo de los 140 °C. A diferencia de la protección contra cortocircuitos/LED abierto y la protección de

cortocircuito de la resistencia se censado SRSP, la secuencia de inicio por sobretemperatura no aparece cada 4 segundos del tiempo de retardo de reinicio automático porque la temperatura se detecta mediante monitoreo interno, no mediante la comprobación de la información de terminales externas. La secuencia de inicio normal se reinicia cuando la temperatura de la unión está fuera de la temperatura de histéresis (140 °C).

5.2 Diagrama de Flujo de Diseño.

Esta sección proporciona una guía paso a paso para usar las herramientas de diseño proporcionadas por ONSEMI para el FL7734.

Flujo de diseño: Aplicar el FL7734 inicia con la definir el sistema, especificando los parámetros de entrada y salida. Posteriormente se calcularán los parámetros de diseño y componentes principales (MOSFET e INDUCTOR) dependiendo del tipo de convertidor seleccionado (4 posibles), finalmente se concluye con el diseño de los elementos del circuito de control.

Notas:

1. Para aumentar la eficiencia, se puede completar un diseño de circuito de amortiguador activo, se muestra en la figura 5.10, según las preferencias del usuario.
2. Es necesario seguir esta sección junto con la hoja de especificaciones del circuito integrado FL7734, para referencias de acrónimos de circuitos y funcionamiento de los subsistemas integrados.

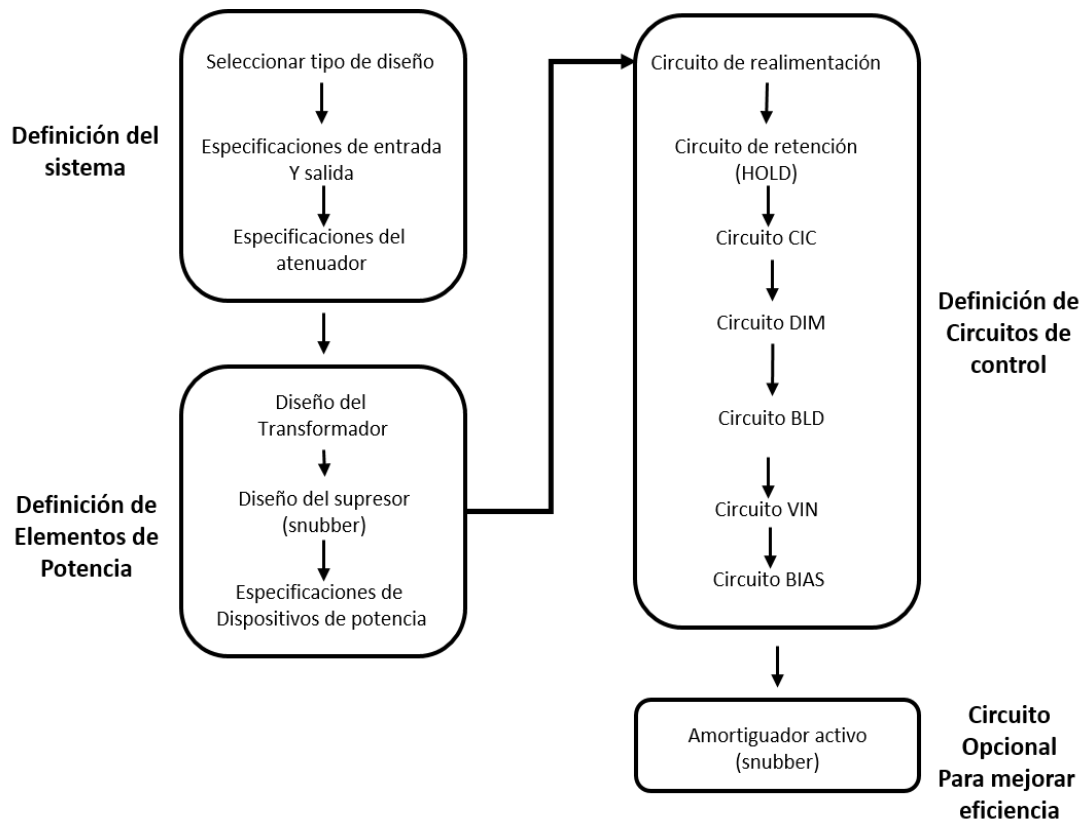


Figura 5.10 Diagrama de bloques del flujo de diseño del FL7734

El diseño se puede realizar con 4 tipos de convertidores:

Diseño de atenuación amplia con dos topologías: **Flyback o Buck-Boost**

Diseño entrada – salida amplia con dos topologías: **Flyback o Buck-Boost**

Para el diseño de atenuación amplia, la tabla 5.2 muestra los parámetros recomendados

Diseño de Atenuación Amplia		
Línea	Línea alta	Línea baja
Rango de potencia de salida	> 3 W	> 3 W
Rango de voltaje de entrada	198~264 Vac (±14%)	108~132 Vac (±10%)
Características	Amplio rango de atenuación (min. I out < 5 %) Mejor inmunidad al parpadeo contra la fluctuación del ángulo de fase	

➔

Ir al diseño Buck-Boost de atenuación amplia

Ir al diseño Flyback de atenuación entrada amplia

Tabla 5.2 Selección del tipo de convertidor, si se requiere atenuación amplia.

En caso de la línea alta, el ángulo de fase mínimo de la mayoría de los atenuadores es grande con un rango de atenuación estrecho. Por lo tanto, los controladores de línea alta de menos de 15 W se diseñan principalmente con base en el método de diseño de atenuación amplia.

En caso de línea baja, el ángulo de fase mínimo de la mayoría de los atenuadores alcanza los 0° y se implementa fácilmente con amplio rango de atenuación.

Otra ventaja del diseño de atenuación amplia es una mejor inmunidad al parpadeo contra la fluctuación del ángulo de fase. Algunos atenuadores tienen una fluctuación aleatoria inherente del ángulo de fase que podría inducir un parpadeo débil, especialmente con un ángulo de fase pequeño, y el diseño de atenuación amplia alivia el parpadeo débil al reducir la corriente de salida.

Para el diseño de entrada y salida amplias, la tabla 5.3 muestra los parámetros recomendados.

Diseño de Entrada-Salida Amplia		
Línea	Línea alta	Línea baja
Rango de potencia de salida	> 15 W	> 5 W
Rango de voltaje de entrada	180 ~ 264 Vac (+/-19%)	90 ~ 132 Vac (±19%)
Características	Amplio rango de voltaje de entrada Amplio rango de voltaje de salida	



Ir al Diseño Buck-boost de Entrada/Salida Amplia

Ir al Diseño Flyback de Entrada/Salida Amplia

Tabla 5.3 Selección del tipo de convertidor si se requiere entrada/salida amplia.

De acuerdo a la topología seleccionada, se continúa el desarrollo, haciendo uso del libro Excel proporcionada por el fabricante, usamos este libro para el diseño propuesto, el cual documentamos en el apartado 5.4 de este capítulo.

El archivo contiene 5 páginas, la principal con el resumen de los 4 tipos de convertidores y las páginas posteriores son de cada uno de los tipos mismos.

La figura 5.11 muestra la página principal del libro, resume el tipo de aplicación y canaliza a los 4 tipos de convertidores.



Guía de diseño del controlador de atenuación por corte de fase FL7734.

Rev. 1.0.0 (2015-01-21)

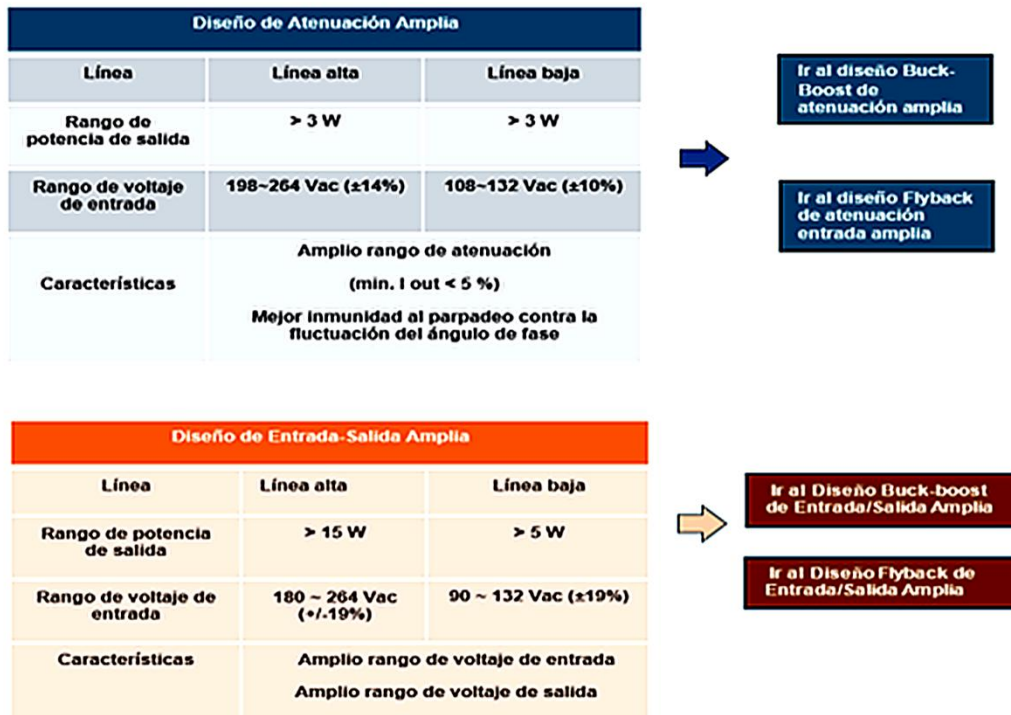


Figura 5.11 Resumen de selección del tipo de convertidor aplicable al FL7734

A continuación, mostramos los pasos requeridos para el diseño:

Paso 1. Especificaciones de entrada / salida, en la figura 5.12 se muestra la sección de especificaciones de entrada y salida del convertidor.

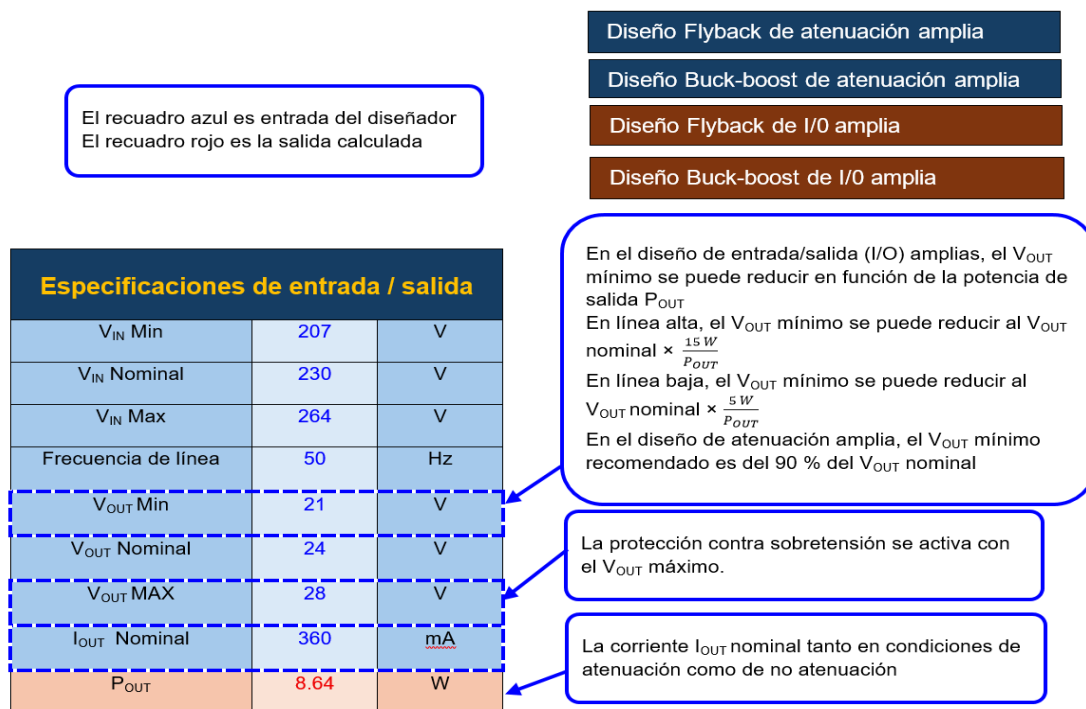


Figura 5.12 Sección de especificaciones de entrada salida del convertidor.

Paso 2. Especificaciones del atenuador (Dimmer), La figura 5.13 muestra la sección del atenuador.

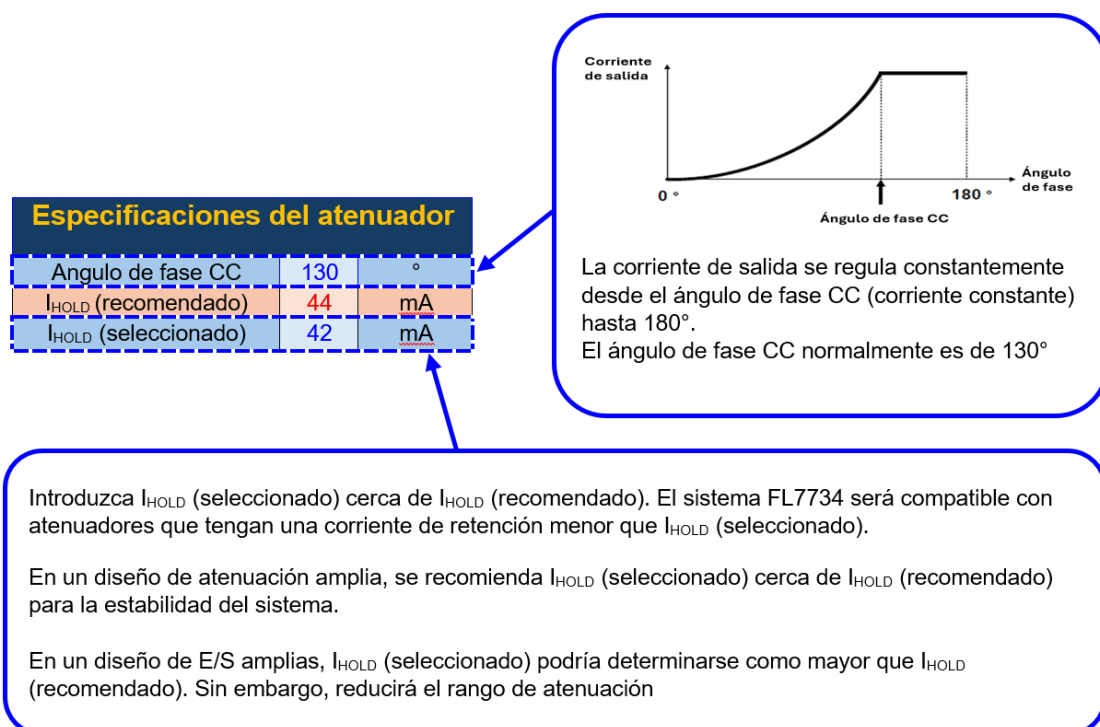


Figura 5.13 Especificaciones del atenuador (Dimmer).

Paso 3. Especificaciones del transformador, las figuras 5.14 y 5.15 muestran las especificaciones para cada caso de convertidor, Flyback o Buck-Boost

Diseño del transformador		
Ciclo de trabajo máximo	20.6	%
Frecuencia de conmutación	60	kHz
Ton del mosfet máximo	3.4	us
Área central del núcleo de la ferrita Ae	36	mm ²
Flujo máximo de la ferrita B _{MAX}	0.30	Tesla
Inductancia requerida para el convertidor L _u	1.49	mH
Número de vueltas mínimo del inductor Min. N _p	97.7	Vueltas
Np(seleccionado)	124	Vueltas
Ns(recomendado)	44.3	Vueltas
Ns(seleccionado)	44	Vueltas
NA(recomendado)	39.5	Vueltas
NA(seleccionado)	40	Vueltas
Inductancia medida L _{Lk}	7.0	uH

Circuito de retroalimentación		
V _{CS} máximo. (esperado)	0.57	V

El ciclo de trabajo máximo (PWM) generalmente esta entre el 10-30%.

Frecuencia de conmutación en modo sin atenuación. Generalmente se establece alrededor de 65 kHz. En general, el ruido EMI de conducción mejora a medida que la frecuencia de conmutación es menor.

El tiempo de encendido del Mosfet (Ton) máximo debe ser inferior a 10 us.

Introduzca un Np que el Np mínimo.

NS y NA (recomendados) dependen del V_{CS} máximo(esperado) en la sección del circuito de retroalimentación. Si NS y NA (recomendados) son demasiados para la ventana permitida del núcleo de la ferrita, aumente el V_{CS} máximo (esperado).

Diseñe el transformador de acuerdo con la especificación anterior. Luego introduzca L_{Lk} midiendo inductancia del primario

Figura 5.14 Sección de diseño del transformador en caso de Flyback atenuación amplia.

Diseño del transformador		
Ciclo de trabajo máximo (PWM)	13.0	%
Frecuencia de conmutación	60	kHz
Ton del mosfet máximo	2.2	us
Área central del núcleo de la ferrita Ae	24	mm ²
Flujo máximo de la ferrita B _{MAX}	0.30	Tesla
Inductancia requerida para el convertidor L _M	0.85	mH
Número de vueltas mínimo del inductor Min. N _p	92.2	Vueltas
Np(seleccionado)	106	Vueltas
NA (recomendado)	63.1	Vueltas
NA (seleccionado)	63	Vueltas

El ciclo de trabajo máximo generalmente esta entre el 10-30%.

Frecuencia de conmutación en modo sin atenuación. Generalmente se establece alrededor de 65 kHz. En general, El ruido EMI de conducción mejora a medida que la frecuencia de conmutación es menor.

El Ton máximo debe ser inferior a 10 us.

Introduzca un Np mayor que el Np mínimo.

Figura 5.15 Sección de diseño del transformador en caso Buck-Boost atenuación amplia.

Paso 4. Especificación del amortiguador (Snubber), la figura 5.16 muestra esta sección.

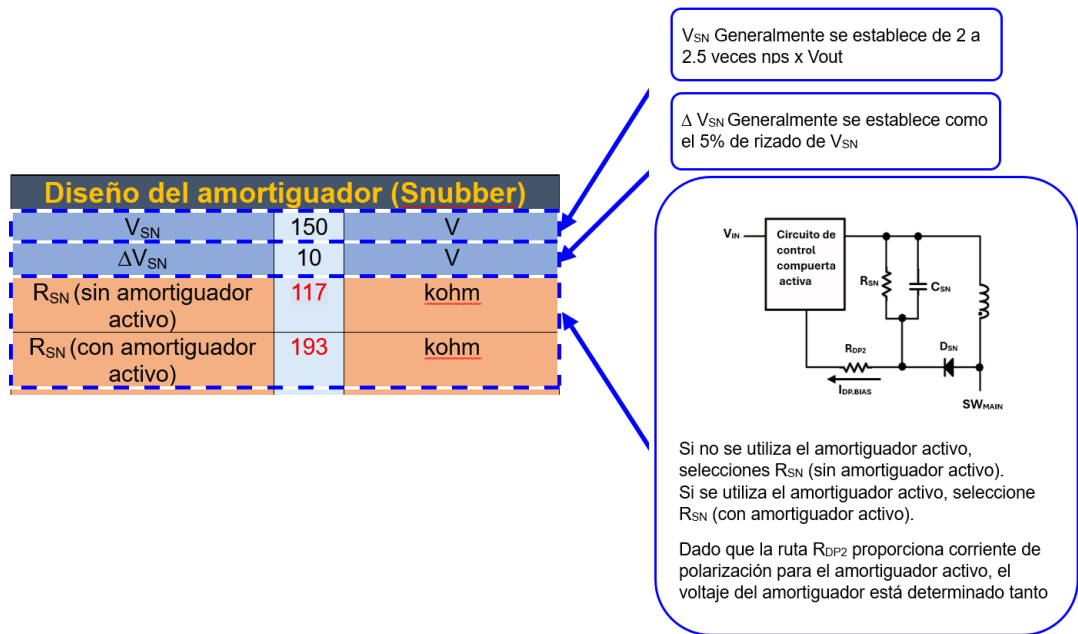


Figura 5.16 Diseño del circuito amortiguador (Snubber) del primario del transformador.

Paso 5. Especificaciones del dispositivo de potencia (MOSFET) y Diodo. Las figuras 5.17 y 5.18 muestran las secciones para Flyback y Buck-Boost

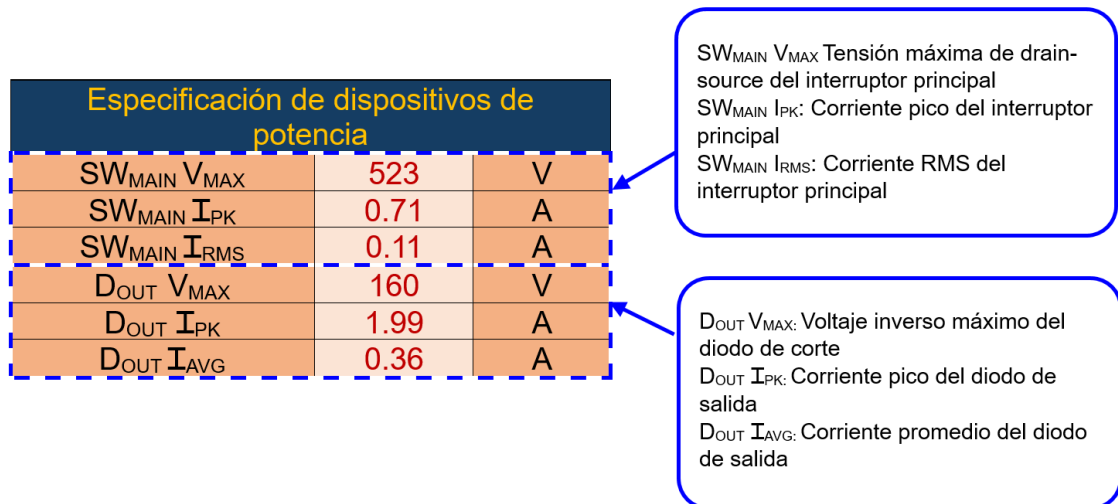


Figura 5.17 Determinación de parámetros del MOSFET y Diodo de corte en caso Flyback.

Especificación del dispositivos de potencia		
$SW_{MAIN} \& D_{OUT} V_{MAX}$	415	V
$SW_{MAIN} \& D_{OUT} I_{PK}$	0.77	A
$SW_{MAIN} I_{RMS}$	0.10	A
$D_{OUT} I_{AVG}$	0.15	A

$SW_{MAIN} \& D_{OUT} V_{MAX}$: Voltaje máximo del interruptor principal y diodo de salida
 $SW_{MAIN} \& D_{OUT} I_{PK}$: Corriente pico de interruptor principal y diodo de salida

$SW_{MAIN} I_{RMS}$: Corriente RMS del interruptor principal

$D_{OUT} V_{MAX}$: Tensión inversa máxima del diodo de salida
 $D_{OUT} I_{PK}$: Corriente pico del diodo de salida
 $D_{OUT} I_{AVG}$: Corriente promedio del diodo de salida

Figura 5.18 Determinación de parámetros del Mosfet y Diodo de corte en caso Buck-Boost.

Paso 6. Circuitos de retroalimentación.

Sensor de la corriente para control de potencia en LEDs. Las figuras 5.19 y 5.20 muestran el cálculo de la resistencia sensor de la corriente referencia, para el control de potencia en LEDs, para cada caso.

Circuito de retroalimentación		
Max. V_{CS} (esperado)	0.57	V
Max. V_{CS} (calculado)	0.60	V
R_{CS}	0.851	Ω

El V_{CS} máximo debe ser inferior al límite de corriente de 1.08V
Un V_{CS} máximo alto aumenta R_{CS} y N_{PS}
-Amplia la región DCM y reduce la región BCM
-Ns y Na se reduce (más margen para el área de la ventana)
-Mayor pérdida del snubber o mayor voltaje del MOSFET
-Menor voltaje máximo del diodo de salida

Figura 5.19 Determinación de resistencia de realimentación para el caso de Flyback.

Circuito de retroalimentación		
$M_{AX. V_{CS}}$	0.56	V
R_{CS}	0.725	Ω

En diseño Buck-Boost, el voltaje máximo no se establece en la sección del circuito de realimentación

- Para una región DCM más amplia, reduzca el ciclo de trabajo (PWM) en la sección del transformador.
- Para obtener más margen en el área de la ventana, reduzca el ciclo de trabajo máximo en la sección del transformador.

El voltaje máximo del MOSFET de conmutación y DIODO de salida es fijo.

Figura 5.20 Determinación de la resistencia de realimentación, caso Buck-Boost

La figura 5.21 Muestra el voltaje en la terminal VS, el eje horizontal es tiempo.

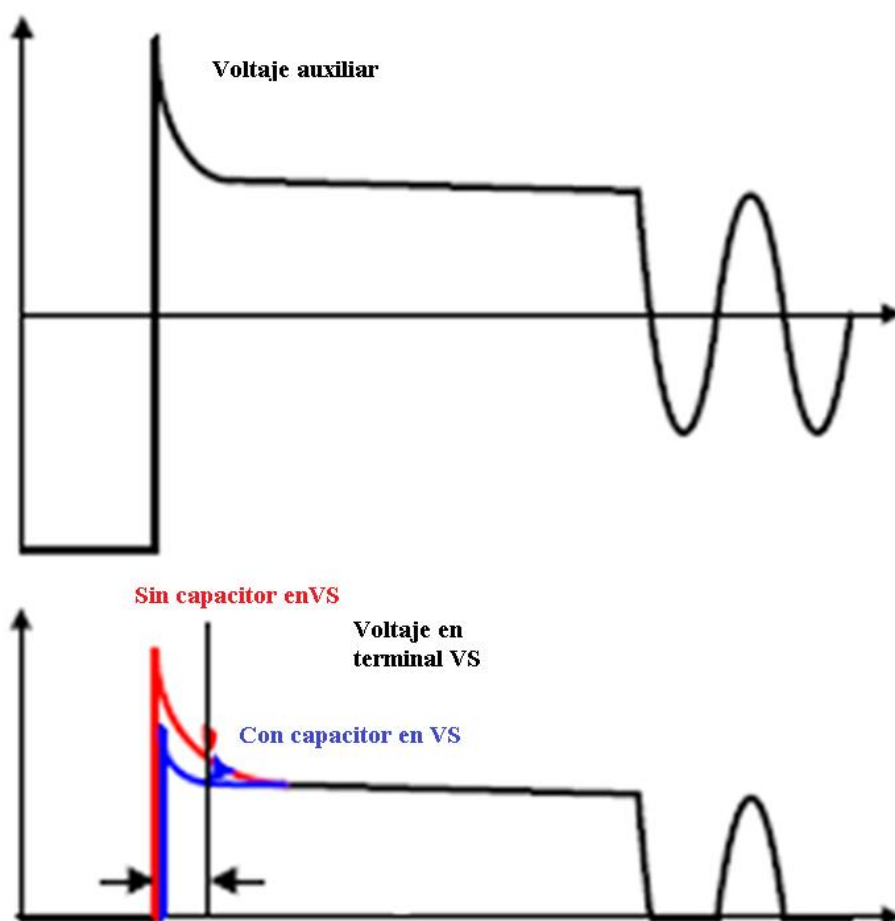


Figura 5.21 Señales en la terminal VS

La figura 5.22 muestra el voltaje en GATE, corriente en el MOSFET principal y los tiempos de apagado. El eje horizontal es tiempo.

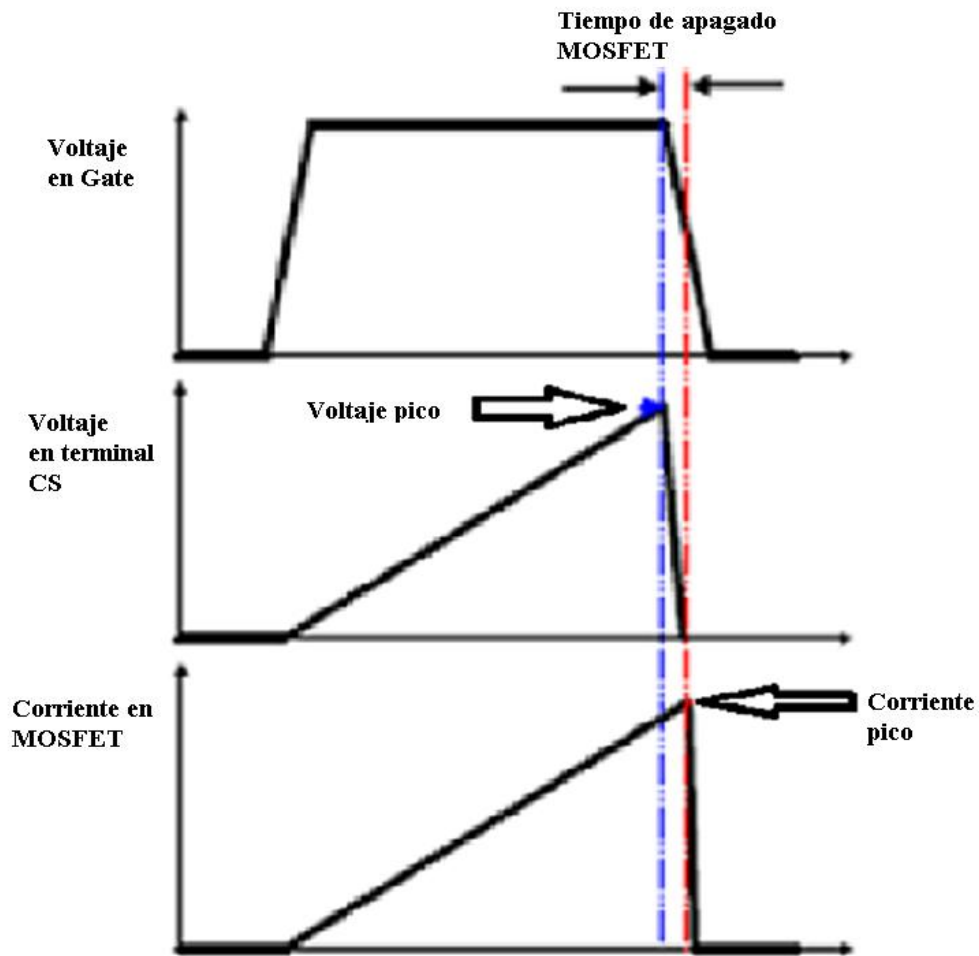


Figura 5.22 Señales en MOSFET principal

De acuerdo a las figuras 5.21 y 5.22 se determinan los componentes de la realimentación en el devanado secundario del transformador, lo que se muestra en la figura 5.23.

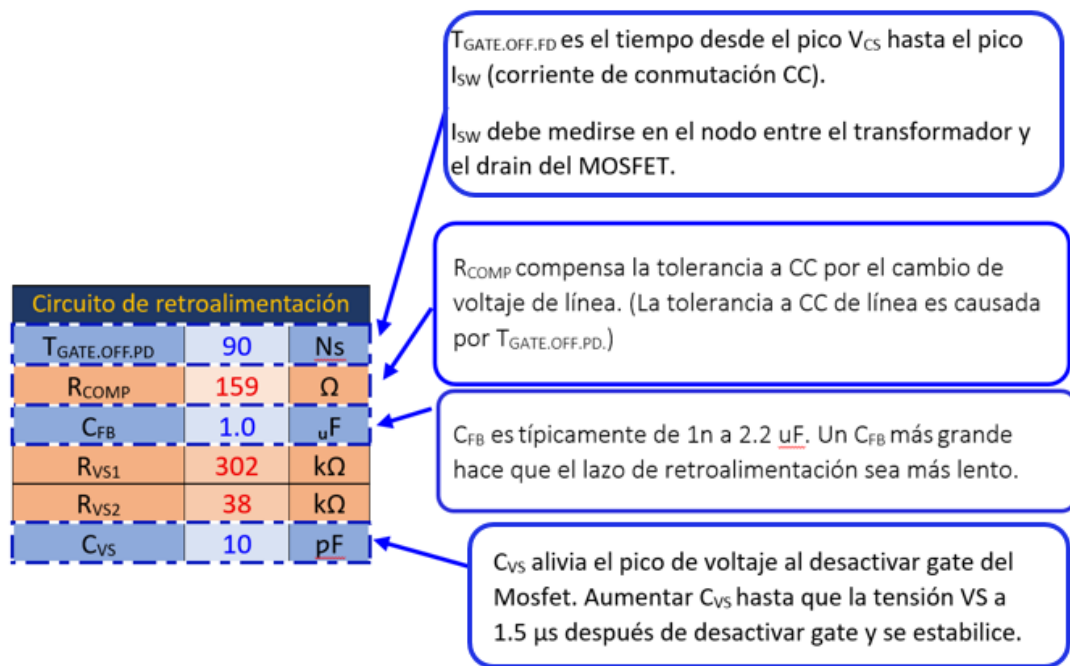


Figura 5.23 Determinación de componentes de realimentación en el devanado secundario del transformador principal.

Paso 7. Circuitos de HOLD

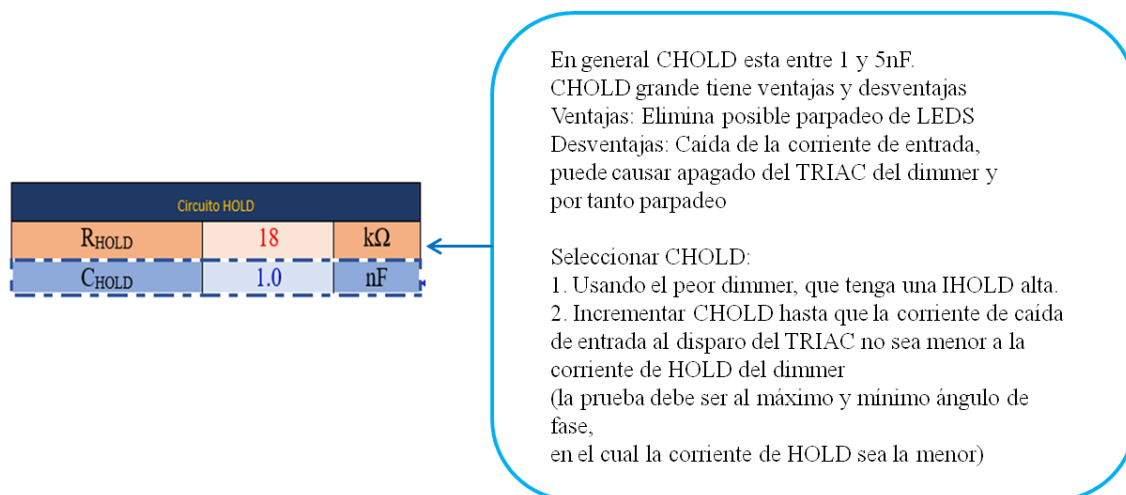


Figura 5.24 Determinación de componentes de corriente HOLD

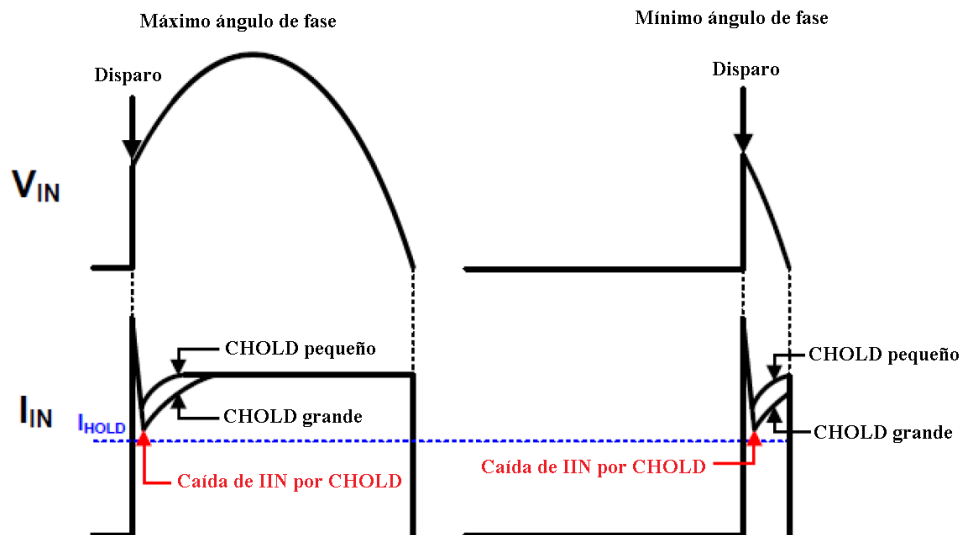


Figura 5.25 Determinación de componentes de corriente HOLD

Paso 8. Circuito CIC

Circuito CIC		
R_{TCIC} (recomendado)	333	K Ω
R_{TCIC} (seleccionado)	330	K Ω
C_{TCIC}	33	nF
SW_{CIC}	2N7002	
D_{CIC}	1N4148WS	
R_{CIC1}	11.4	k Ω
R_{CIC2}	8.6	k Ω

Rendimiento y tolerancia de temperatura.
 R_{TCIC} debe de ser inferior a $\pm 1\%$.
 C_{TCIC} debe de ser inferior a $\pm 5\%$.

El voltaje FB puede controlar el voltaje HOLD mediante el circuito pull-up HOLD (SW_{CIC} , R_{CIC1} y R_{CIC2}).
 Cuando se aumenta el voltaje de FB, el voltaje, HOLD se eleva y el nivel de corriente de entrada aumenta con mayor suministro de potencia.

Figura 5.26 Elementos del Circuito CIC.

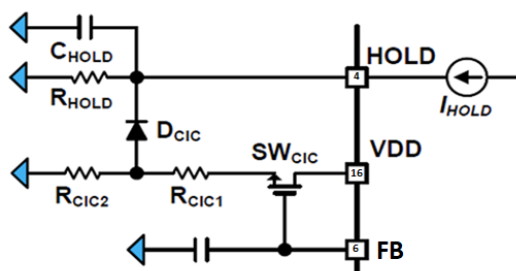


Figura 5.27 Circuito CIC

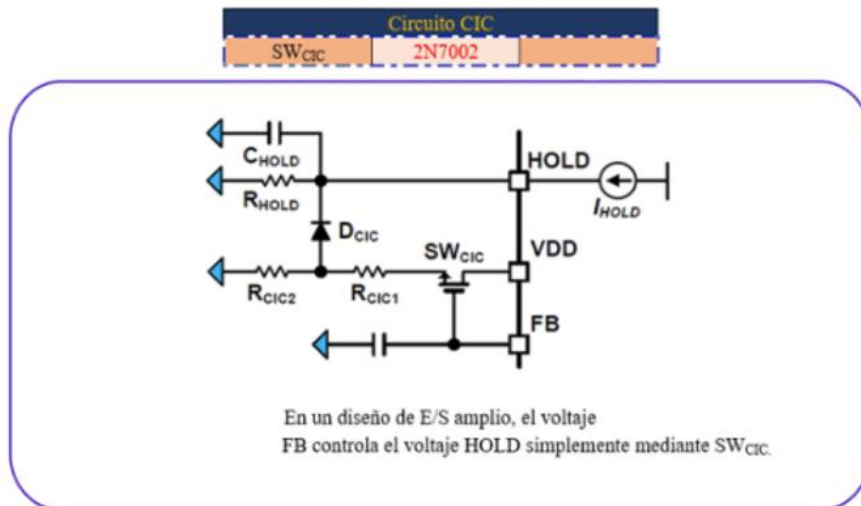


Figura 5.28 Transistor SW_{cic} del Circuito CIC.

Paso 9. Circuito DIM

Circuito atenuado		
R _{DIM1}	24	KΩ
R _{DIM2}	90	KΩ
C _{DIM}	438	nF

[Tolerancia de Rendimiento y Temperatura]

– La tolerancia de R_{DIM1} y R_{DIM2} debe ser menor a ±1 %.

$$\frac{R_{DIM2}}{R_{DIM1} + R_{DIM2}} = r_{DIM}$$

* Límite máximo de r_{DIM}

– En un diseño de entrada/salida amplia (Wide I/O), el r_{DIM} calculado es lo suficientemente bajo y la señal FB apenas es limitada (clamped) por MOD bajo la condición de ángulo de fase máximo.

– Por lo tanto, el usuario no necesita verificar la limitación (clamping) de FB, como sí se requiere en el diseño de atenuación amplia (wide dimming design).

* Límite mínimo de r_{DIM}

– En un diseño de entrada/salida amplia (Wide I/O), no existe oscilación de la corriente de salida con parpadeo visible periódico.

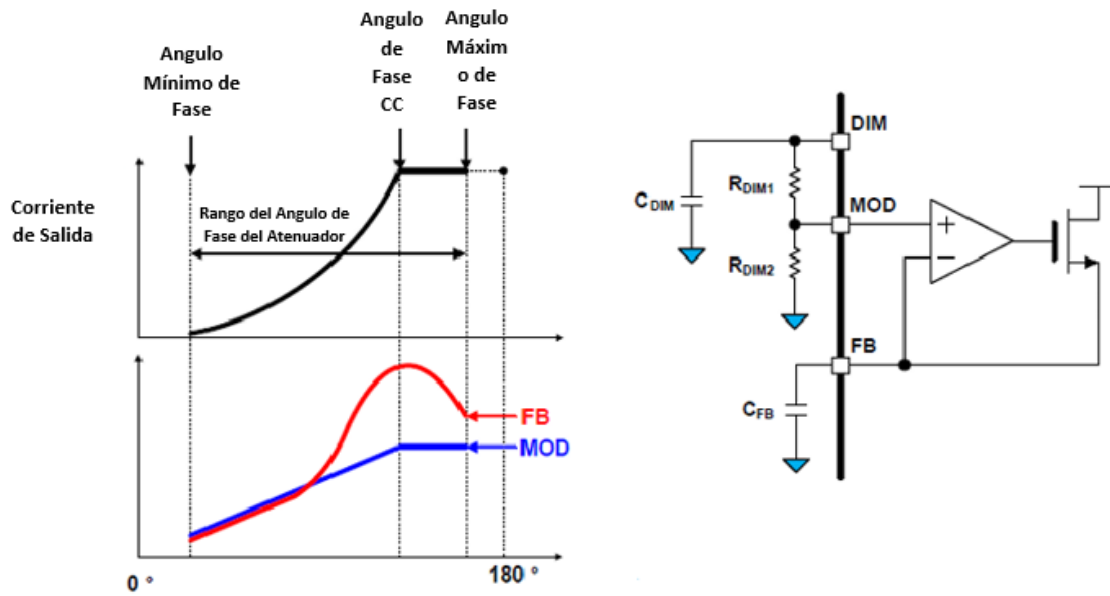


Figura 5.29 Circuito DIN

Paso 10. Circuito VI

Circuito VIN		
R_{VIN1}	2.00	MΩ
R_{VIN2}	106	KΩ
C_{VIN}	100	pF

En la línea alta, R_{VIN1} es de 2 Mohm.
En la línea baja, R_{VIN1} es de 620 kohm.

Filtros C_{VIN} que conmutan el ruido en el pin VIN.

Figura 5.30 Circuito de VIN

Paso 11. Circuito Bleeding

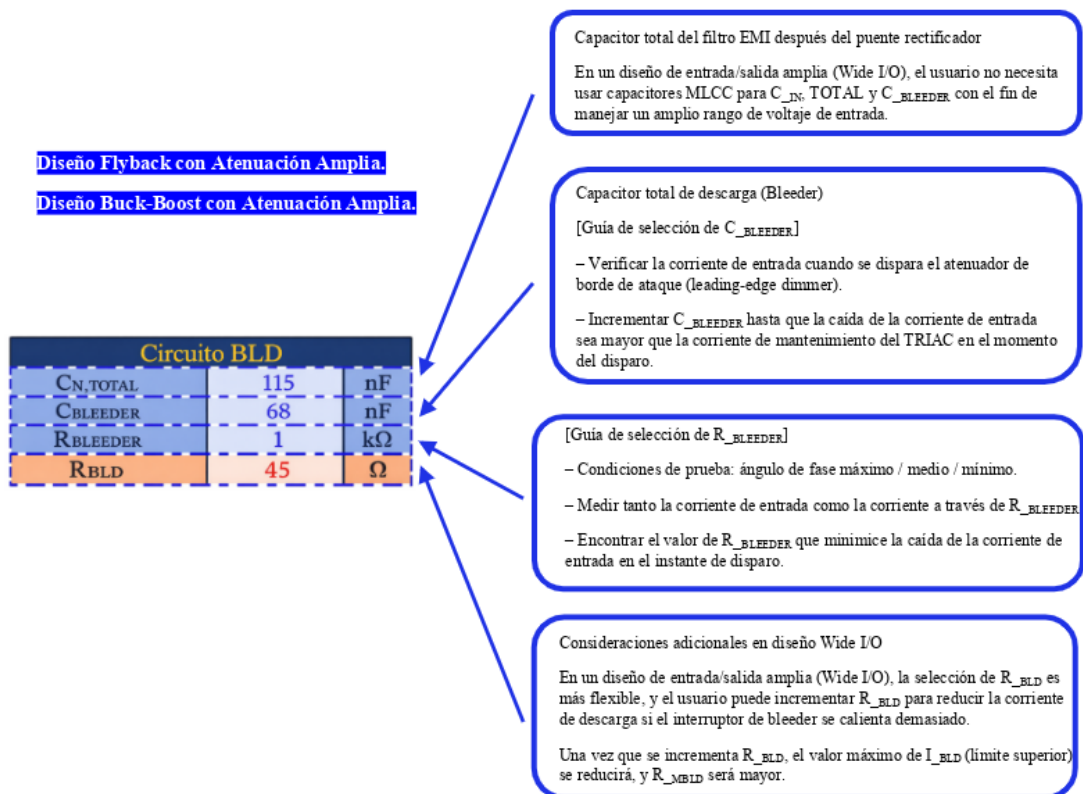


Figura 5.31 Valores del Circuito de purga

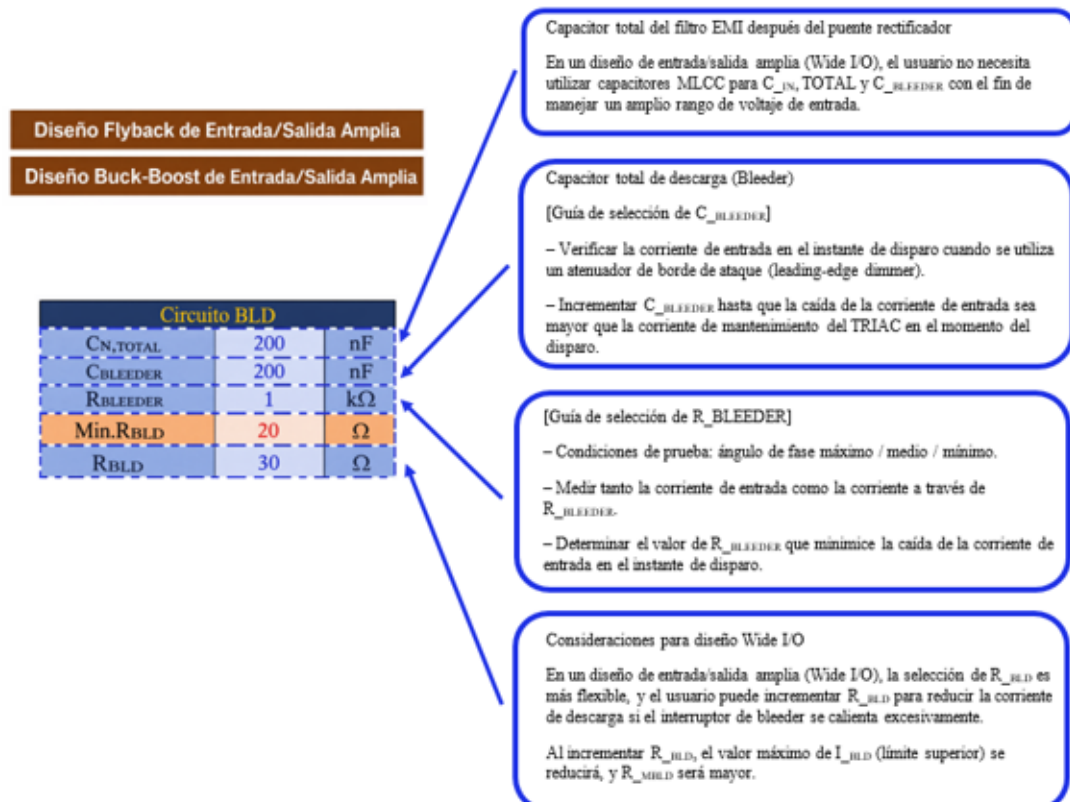


Figura 5.32 Circuito de BDL

Circuito BLD		
MAX_IBLED (límite superior)	111	mA
MAX_IBLED	96	mA
R_MBLD	108	kΩ
R_BLD	63	Ω
R_VDD1	100	Ω

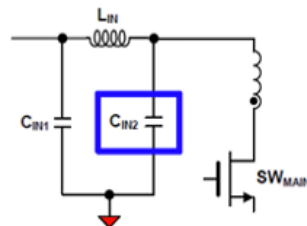
Corriente de purga máxima: Corriente de purga durante la secuencia de arranque y el tiempo de corte d fase. Seleccione este valor por debajo de MAX_IBLED (límite superior).

Un MAX_IBLED más alto puede tener más margen para mantener la corriente de entrada más alta que la corriente de mantenimiento durante la secuencia de arranque.

Un MAX_IBLED más bajo puede reducir la temperatura del SW_BLD durante la secuencia de arranque y el tiempo de AR.

R_VDD1 amortigua el ruido de pico de borde delantero en el pin VDD. Se recomienda 100 ohm en línea alta y 50 ohm en línea baja.

Figura 5.33 Circuito de BDL



Condensador de filtro EMI total de C_M2 conectado directamente al transformador.

Circuito BLD		
C_M2	68	nF
R_OFFSET	28	kΩ

SRSP (protección contra cortocircuito de la resistencia de detección) se activa cuando el voltaje de CS es inferior a 0.1V en la primera y segunda conmutación.

Cuando Lm tiene un diseño alto, SRSP podría activarse de forma anormal debido a un bajo voltaje pico CS.

R_OFFSET puede proteger el sistema de SRSP activado de forma anormal mediante la creación de una compensación de voltaje en R_COMP.

Si el pico de CS es mucho mayor que 0.1V con Lm pequeño, aparecerá el mensaje “abierto” y el usuario no necesitara agregar R_OFFSET

Figura 5.34 Circuito de polarización

Paso 12. Circuito BIAS

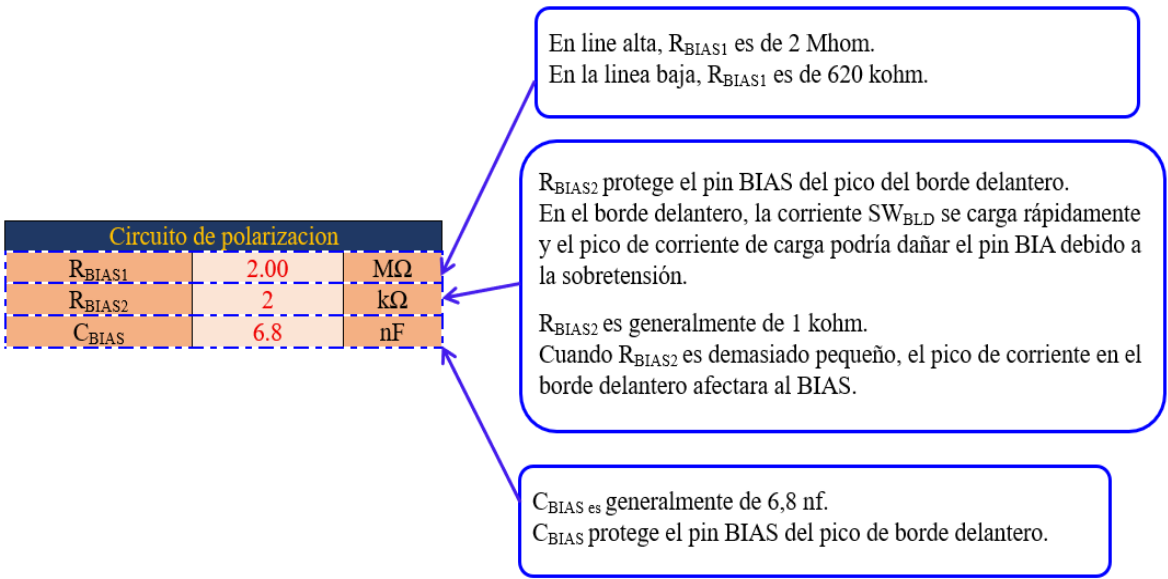


Figura 5.35 Circuito del amortiguador activo

Paso 13. Circuito Amortiguado Activo

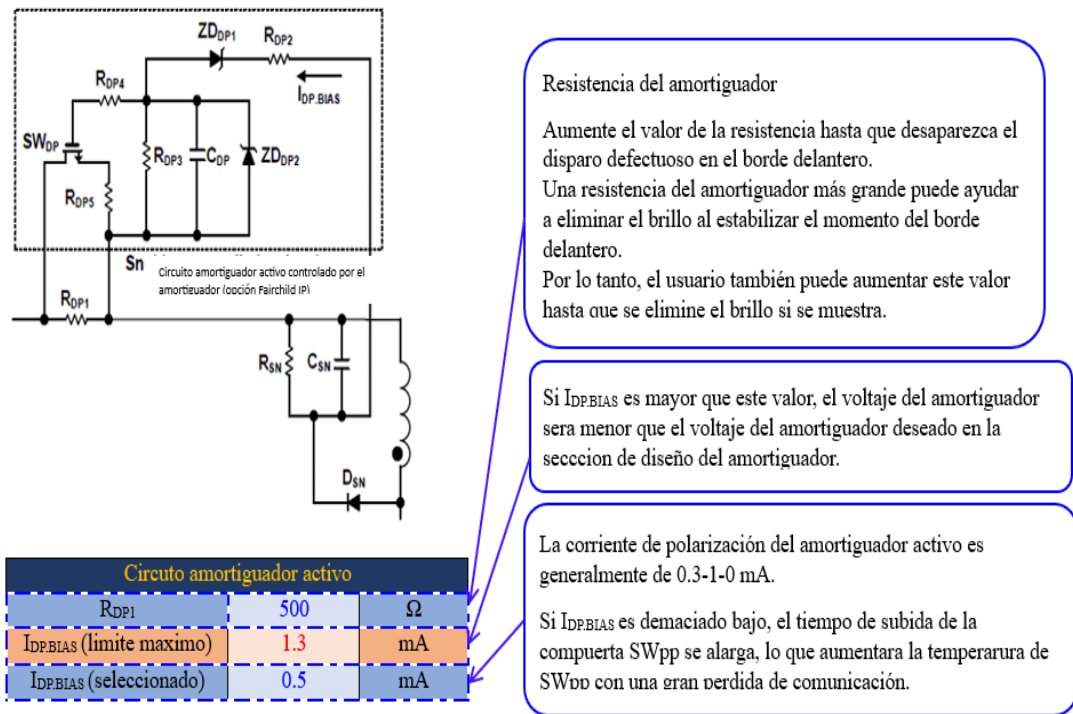


Figura 5.36 Circuito de amortiguadora activo

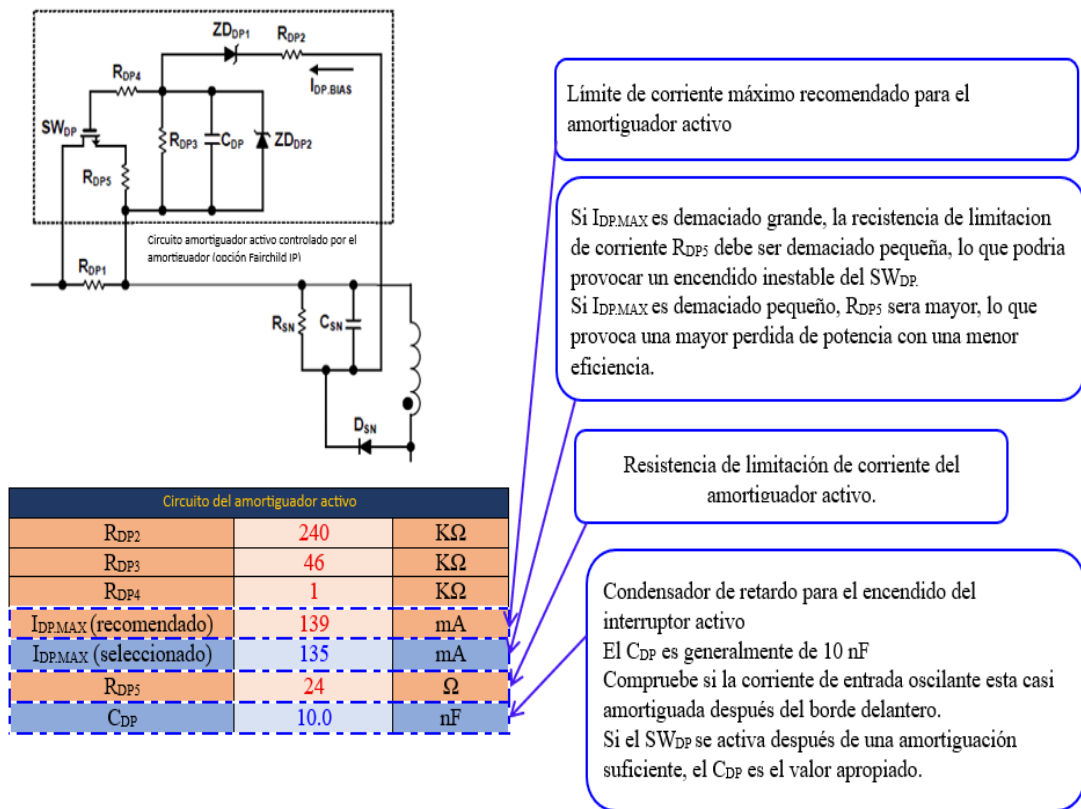


Figura 5.37 Circuito de amortiguador activo

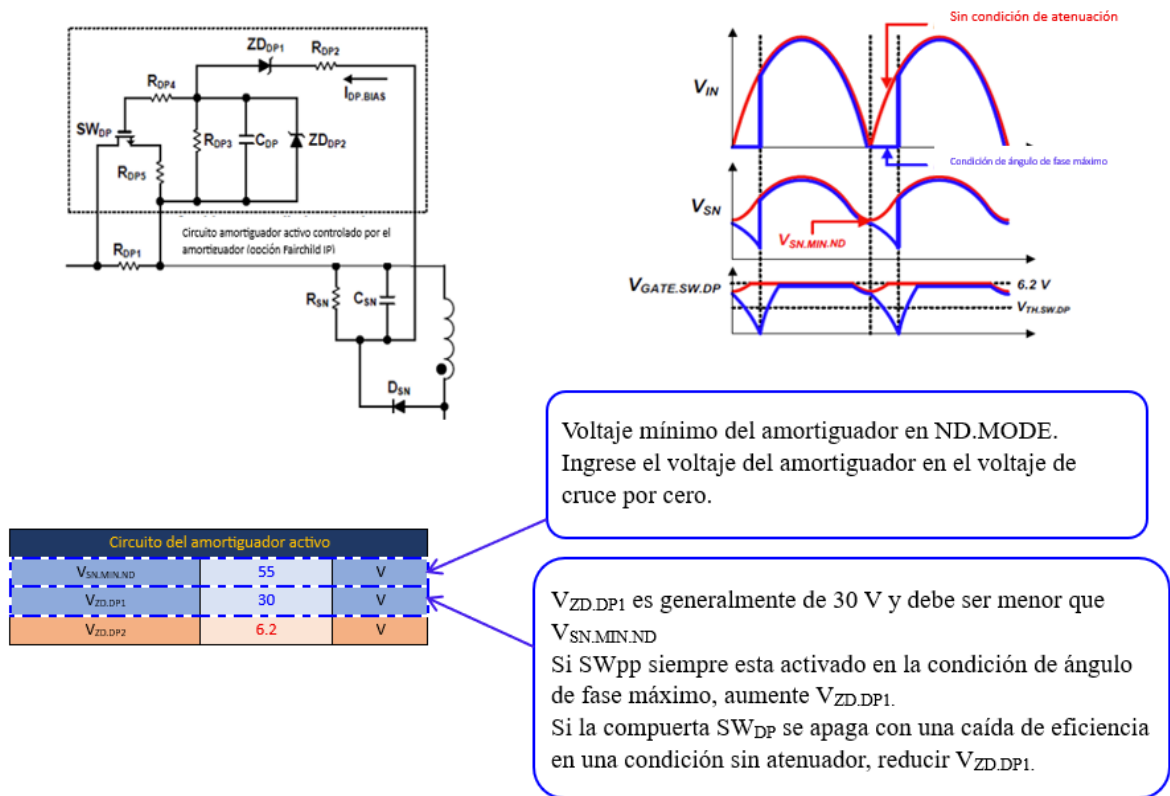


Figura 5.38 Circuito de amortiguador activo

5.3 Diseño utilizando la Hoja de Cálculo.

Para el caso de nuestra aplicación se decide el Diseño de Entrada/Salida amplias en topología Buck-Boost, la figura 5.39 muestra la página del libro de este tipo de convertidor, el diagrama esquemático básico de aplicación y las 4 secciones de cálculo de circuitos y sus componentes.

FL7734 Phase-cut Dimming
Wide I/O Buckboost Design

Input/Output Spec		
Min. V_{in}	140	V
Rated V_{in}	170	V
Max. V_{in}	200	V
Line freq.	60	Hz
Min. V_{out}	28	V
Rated V_{out}	29	V
Max. V_{out}	30	V
Rated I_{out}	900	mA
P_{out}	26.10	W
Dimmer Spec		
CC phase angle	130	°
I_{load} (recommended)	165	mA
I_{load} (selected)	165	mA

Transformer Design		
Max. Duty	25.0	%
Switching freq.	60	kHz
Max. Ton	4.2	µs
A_e	24	mm ²
B_{max}	0.30	
L_{eq}	0.33	mH
Min. N_p	214.4	T
N_p (selected)	220	T
N_s (recommended)	183.3	T
N_s (selected)	180	T
Power Device Rating		
SW_{max} & D_{out} V_{max}	313	V
SW_{max} & D_{out} I_{avg}	4.64	A
SW_{max} I_{rms}	0.46	A
D_{out} I_{avg}	0.90	A

Feedback Circuit		
Max. V_{cs}	0.56	V
R_{cs}	0.121	Ω
$T_{gate,COMP}$	90	ns
R_{comp}	50	Ω
C_{fb}	1.0	µF
R_{bias}	304	kΩ
R_{s2}	40	kΩ
C_{gs}	10	pF
HOLD Circuit		
R_{hold} (recommended)	10	kΩ
C_{hold}	1.0	nF
CIC Circuit		
SW_{cic}	2N7002	
DIM Circuit		
R_{dim1}	102	kΩ
R_{dim2}	13	kΩ
C_{dim}	438	nF

VIN Circuit		
R_{vin1}	0.62	MΩ
R_{vin2}	47	kΩ
C_{vin}	100	pF
BLD Circuit		
$C_{in, TOTAL}$	200	nF
$C_{gate,DRIVER}$	100	nF
$R_{s1,DRIVER}$	1	kΩ
Min. $R_{s1,DRIVER}$	32	Ω
$R_{s1,DRIVER}$	50	Ω
Max. I_{load} (upper limit)	100	mA
Max. I_{load}	96	mA
$R_{s1,DRIVER}$	120	kΩ
$R_{s1,DRIVER}$	85	Ω
$R_{s1,DRIVER}$	50	Ω
C_{gate}	68	nF
$R_{s1,DRIVER}$	2	kΩ
BIAS Circuit		
R_{bias1}	0.62	MΩ
R_{bias2}	1	kΩ
C_{bias}	6.8	nF

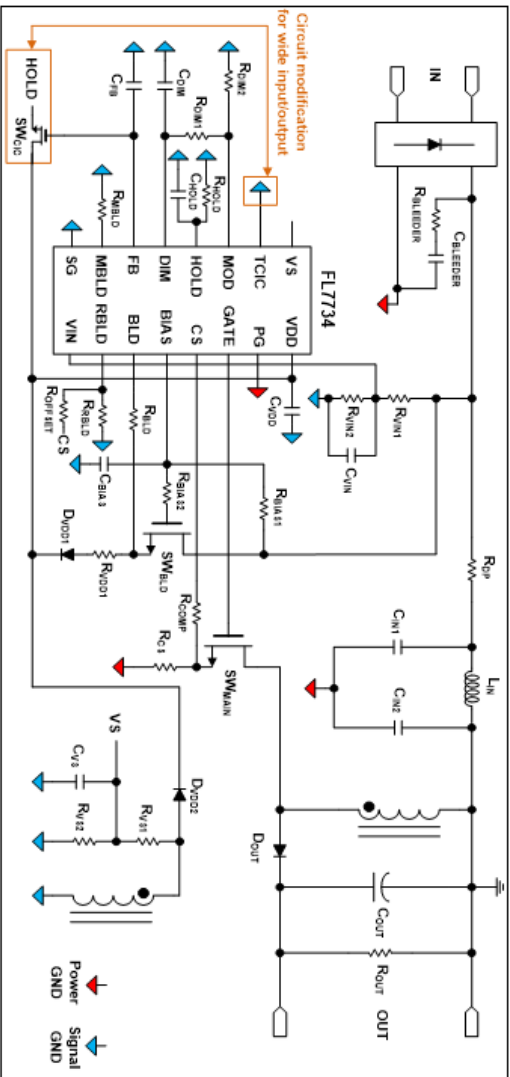


Figura 5.39 Aplicación del FL7734 como convertidor Buck-Boost de entrada/salida amplia.

Las secciones de cálculo de este convertidor son:

- Especificación de Entrada/ Salida
- Datos del transformador requerido y datos a cumplir por el transistor Mosfet principal.
- Cálculo de componentes de las secciones Feedback, HOLD, CIC y DIM.
- Cálculo de los componentes de las secciones VIN, BLD y BIAS.

En la sección siguiente se determinan los componentes del convertidor para el LED COB de Bridgelux seleccionado, cuyas especificaciones son: $V_{led} = 29V$ y $I_{led} = 1050mA$

5.3 Diseño Propuesto, especificaciones de componentes.

FL7734 Phase-cut Dimming Wide I/O Buckboost Design		
Input/Output Spec		
Min. V_{IN}	90	V
Rated V_{IN}	127	V
Max. V_{IN}	150	V
Line freq.	60	Hz
Min. V_{OUT}	28	V
Rated V_{OUT}	29	V
Max. V_{OUT}	30	V
Rated I_{OUT}	900	mA
P_{OUT}	26.10	W
Dimmer Spec		
CC phase angle	130	°
I_{HOLD} (recommended)	220	mA
I_{HOLD} (selected)	165	mA
Input : Enter value by user		
Output : Calculation result		

Figura 5.40 Especificaciones de entrada y salida del convertidor propuesto

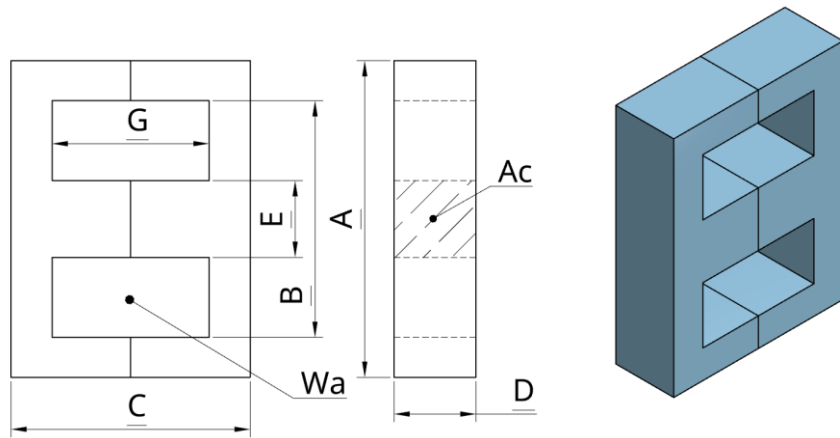


Figura 5.41 Especificaciones del núcleo del transformador de potencia.

En la figura 5.41 se contempla una ferrita EE de sección Ac de 49 mm^2 , el diseño específico del transformador lo documentamos en la sección 5.3.

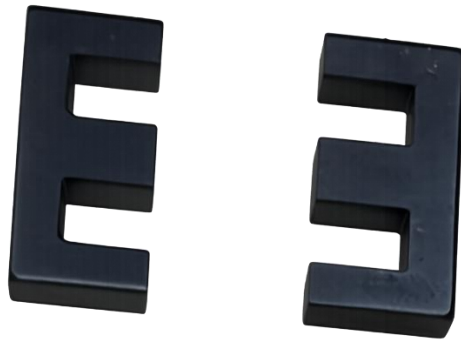


Figura 5.42 Ferrita EE

5.1.7 Diseño Propuesto, especificaciones (Voltaje de LED 29v, Corriente de LED 1050 mA).

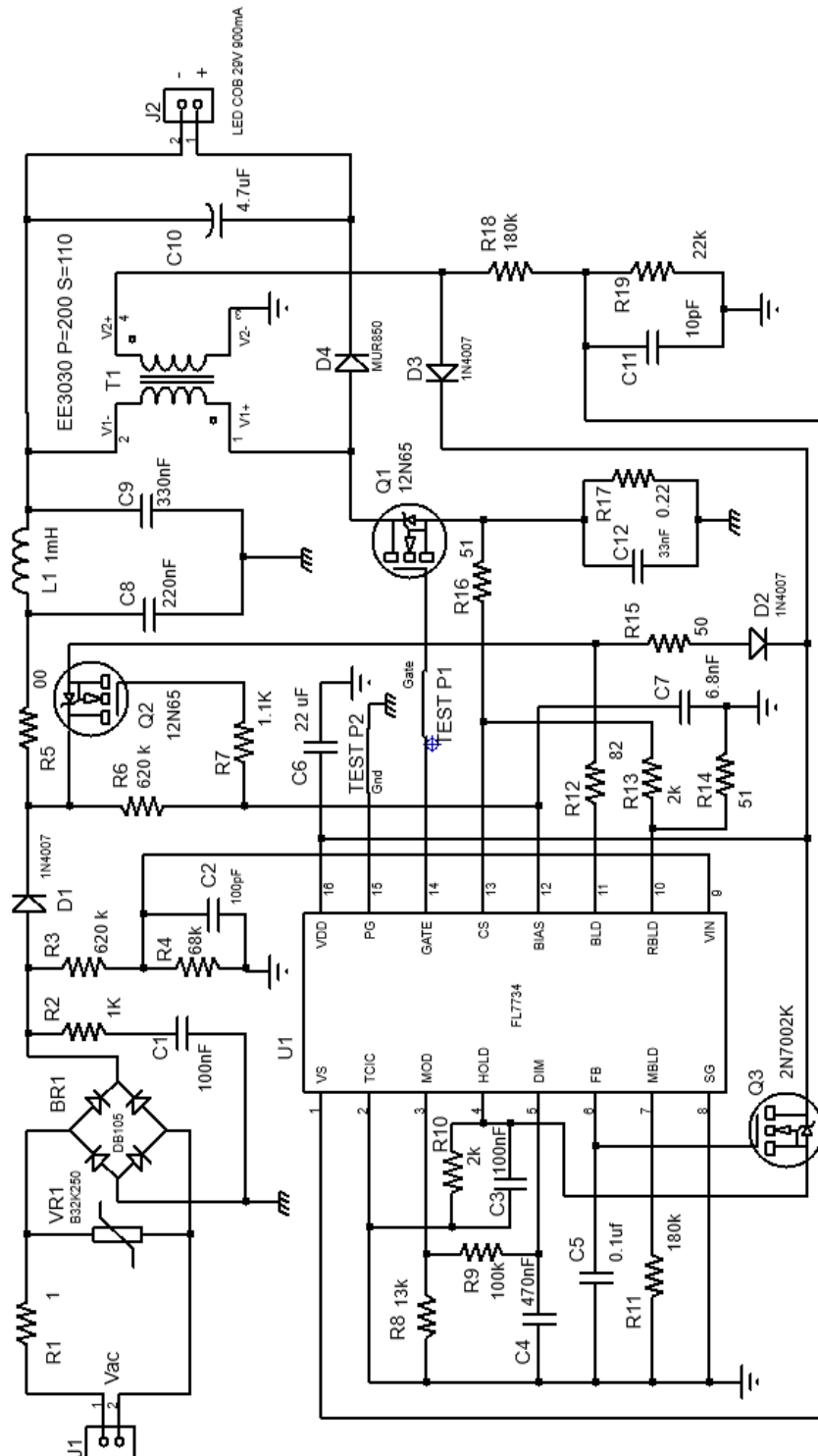


Figura 5.43 Diagrama esquemático de Diseño Propuesto con FL7734

5.2 Resumen de valores de Componentes del diseño del FL7734

Componente	Cantidad	Referencia	Valor	Unidad
Capacitor	2	C1,C3	100nF	Unidad
Capacitor	1	C2	100pF	Unidad
Capacitor	1	C4	470nF	Unidad
Capacitor	1	C5	0.1uf	Unidad
Capacitor	1	C6	22 uF	Unidad
Capacitor	1	C7	6.8nF	Unidad
Capacitor	1	C8	220nF	Unidad
Capacitor	1	C9	330nF	Unidad
Capacitor	1	C10	4.7uF	Unidad
Capacitor	1	C11	10pF	Unidad
Capacitor	1	C12	33nF	Unidad
Resistencia	1	R1	1	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R2	1K	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	2	R3,R6	620 k	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R4	68k	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R5	00	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R7	1.1K	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R8	13k	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R9	100k	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	2	R10,R13	2k	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	2	R11,R18	180k	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R12	82	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	2	R14,R16	51	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R15	50	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	2	R17,R20	0.22	Paquete de 10 resistencias
Resistencia	1	R19	22k	Paquete de 10 resistencias
Circuito Integrado	1	U1	FL7734	Unidad
Transistor	2	Q1-Q2	12N65	Unidad
Transistor	1	Q3	2N7002K	Unidad
Diodo	3	D1-D3	1N4007	Paquete de 5 diodos
Diodo	1	D4	MUR850	Unidad
Puerto Rectificador	1	BR1	DB105	Unidad rectificador
Terminal	2	J1-J2	TBLOCK-M2	Unidad
Alambre Magneto	1	L1	1mH	por 1 metro alambre magneto
Alambre Magneto	1	T1	EE3030 P=200 S=110	por 1 metro alambre magneto
Miscellaneous	1	TEST P1	Gate	na
Miscellaneous	1	TEST P2	Gnd	na
Varistor	1	VR1	B32K250	Unidad varistor
Tablafenolica	1	1pz	20x20	20x20
Pasta	1	1pz	100g	Unidad
Soldadura	1	1pz	100g	60/40
Varniz	1	1L	1L	
Ácido Férrico	1	1L	1L	
Impresiones	1	1hoja	1hoja	

Tabla 5.4 Componentes del diseño del FL7734

5.3 Diseño del Transformador.

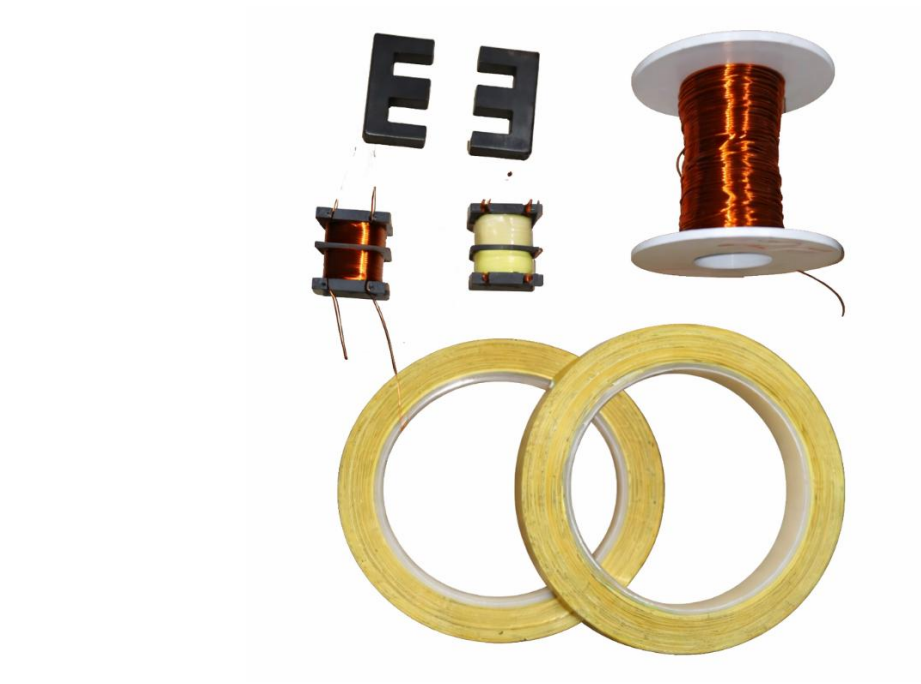


Figura 5.44 Materiales para diseño de Transformador.

Materiales

- Alambre Magneto calibre 22 y 19
- Ferrita EE
- Cinta eléctrica para aislar.
- 4 terminales para Protoboard
- Pinzas de Corte
- Pinzas de Punta
- Barniz
- Maquina embobinadora
- Carrete en impresora 3D

5.3.1 Pasos de procedimiento de Diseño

A continuación presentamos el procedimiento de diseño de elementos magnéticos, de acuerdo a lo propuesto en la Tesis del **Ing. Roger Carrillo** [²⁸].

1. **Inductancia deseada (L):** Valor requerido según la aplicación.
2. **Corriente de operación (I_o):** Se establece según la carga del sistema.
3. **Corriente de rizo (ΔI):** Normalmente se establece como un porcentaje de I_o.
4. **Corriente total (I):** Se obtiene como

$$I = I_o + \Delta I$$

5. **Frecuencia de operación (f):** Determinada por el controlador o diseño del sistema.
6. Incremento de temperatura (ΔT): Se define mediante constante K_j. Ejemplos:

$$\Delta T = 25^{\circ}C \rightarrow K_j = 433$$

$$\Delta T = 50^{\circ}C \rightarrow K_j = 632$$

7. Densidad de flujo magnético (B_m): Se define en función del material del núcleo.
8. Material del núcleo: Seleccionado según aplicación, eficiencia y costos.
9. Forma geométrica: Según disponibilidad comercial del núcleo.
10. Energía almacenada (E): Calculada como

$$E = \frac{1}{2} L I^2$$

11. Factor de llenado de la ventana (K_u): Aproximado como K_u=0.4 para núcleos tipo EE y EI.
12. Producto de áreas (A_p):

$$A_p = \left(\frac{2E * 10^4}{K_u * K_j * B_m} \right)^x$$

con $x=8/7=1.143$ para formas geométricas estándar.

²⁸ CENIDET. DISEÑO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS EN ALTA FRECUENCIA. T E S I S PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN C I E N C I A S EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA. CUERNAVACA. MORELOS, MÉXICO DICIEMBRE 2004.

13. Elegir núcleo con A_p mayor al calculado.
14. Verificar A_p del núcleo elegido.
15. **Longitud media de vuelta (MLT):** Dato del fabricante del núcleo.
16. **Área transversal (A_c):** También proporcionado por el fabricante.
17. **Área de ventana (W_a):** Proporcionado por el fabricante.
18. **Área disponible para embobinado (w_a):** Del carrete o bobinador.
19. **Área total del núcleo (A_t):** Sumatoria de secciones geométricas.
20. **Peso del núcleo (W_{fe}):** Dato físico del núcleo.
21. **Densidad de corriente (J):** J Depende de la forma del conductor y aplicación.

$$J = k_j A_p^y \text{ y depende forma geométrica, en este caso } y=0.5$$

22. **Área del conductor desnudo (A_{wb}):**

$$A_{wb} = \frac{I}{J}$$

23. **Seleccionar calibre AWG:** De acuerdo con el área A_{wb} .
24. **Resistencia por unidad de longitud (RI):** Según tabla AWG.
25. **Área del conductor seleccionado: tabla AWG**
26. **Área efectiva de ventana (W_{aeff}):**

$$W_{aeff}$$

27. **Número de vueltas (N):**

$$N = \frac{W_{aeff} K_u}{A_{wb}}$$

28. **Entrehierro (l_g):** Determinado mediante fórmula.

$$l_g = \frac{0.4 N^2 A * 10^{-8}}{L}$$

29. **Flujo de dispersión (F):**

$$F = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \ln \left(\frac{2G}{L_g} \right)$$

Donde G es la altura media de la ventana W_a .

30. Recalcular número de vueltas (N_c): Puede requerirse ajuste por espacio físico.

$$N_c = \frac{N}{\sqrt{F}}$$

31. Resistencia del embobinado (R):

$$R = N_c(MLT)(R_t)$$

32. Pérdidas por cobre (P_{cu}):

$$P_{cu} = I^2 * R$$

5.3.2 Transformador Propuesto

Utilizando datos y especificaciones del fabricante Magnetics [²⁹] se utilizará un núcleo tipo EE del mismo, de acuerdo al diseño que se obtenga con el procedimiento de la sección 5.3.1 anterior. Del fabricante destacamos dimensiones y especificaciones magnéticas mostradas en la figura 5.45 y tablas 5.4 y 5.5.

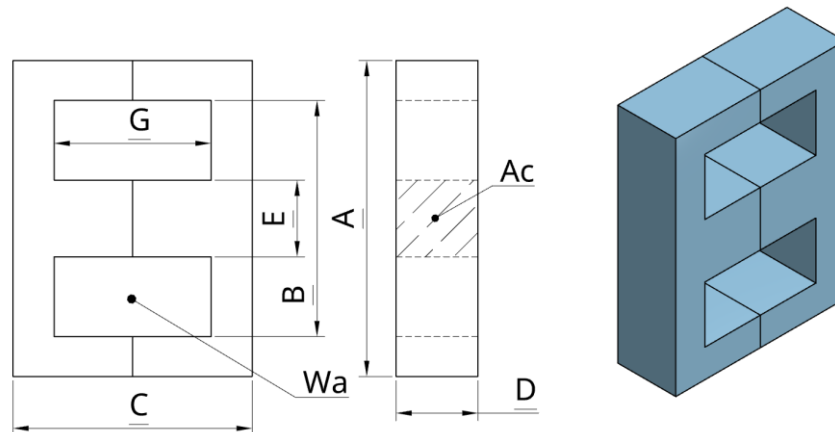


Figura 5.45 Dimensiones de ferritas EE, del fabricante Magnetics

²⁹ Magnetics Empresa estadounidense fundada en 1949, especializada en el diseño y fabricación de componentes magnéticos suaves utilizados en aplicaciones electrónicas y de potencia.

Parte	A cm	B cm	C cm	D cm	E cm	G cm
EE-187	1.930	1.392	1.620	0.478	0.478	1.108
EE-2425	2.515	1.880	1.906	0.653	0.610	1.250
EE-375	3.454	2.527	2.820	0.935	0.932	1.930
EE-21	4.087	2.832	3.300	1.252	1.252	2.080
EE-625	4.712	3.162	3.940	1.567	1.567	2.420
EE-75	5.657	3.810	4.720	1.880	1.880	2.900

Tabla 5.5 Dimensiones para ferritas EE (cm), Magnetics

Parte	Wt _{cu} gramos	Wt _{fe} ferrita gramos	MLT cm	MPL cm	Wa/Ac	Ac cm ²	Wa cm ²	Ap cm ⁴	Kg cm ⁵	At cm ²	*AL mH/1K
EE-187	6.8	4.4	3.8	4.01	2.219	0.228	0.506	0.116	0.0028	14.4	500
EE-2425	13.9	9.5	4.9	4.85	2.068	0.384	0.794	0.305	0.0095	23.5	767
EE-375	36.4	33.0	6.6	6.94	1.875	0.821	1.539	1.264	0.0624	45.3	1167
EE-21	47.3	57.0	8.1	7.75	1.103	1.490	1.643	2.448	0.1802	60.9	1967
EE-625	64.4	103.0	9.4	8.90	0.808	2.390	1.930	4.616	0.4700	81.8	2767
EE-75	111.1	179.0	11.2	10.70	0.826	3.390	2.799	9.487	1.1527	118.0	3467

* Este valor AL está normalizado para una permeabilidad de 1K. Para una aproximación a otros valores de permeabilidad, multiplique por la nueva permeabilidad. Si la permeabilidad es 2500, multiplique por 2.5.

Tabla 5.6 Propiedades magnéticas para ferritas EE del fabricante Magnetics

Se hizo una hoja de cálculo Excel con el procedimiento de diseño del apartado 5.3.1 para calcular el inductor del convertidor. Los resultados se muestran en la tabla 5.6 a continuación.

Inductor del convertidor			
1 Inductancia deseada	L	0.00054	H
2 Icorriente en Leds	Ileds	0.9	A
3 Ileds Rizo	Iirizo	0.1	A
4 Ileds total	Ileds T	1	A
5 Frecuencia Op	Fo	60000	H
6 Inc Temp Kj	Kj	632	A/cm ²
7 Flujo de Op	βm	0.3	T
8 Mat Núcleo	Ferrita	MnZn	
9 Forma Núcleo	EE	EE-2425	
10 Energía Núcleo	E	0.00027	W/seg
11 Factor de llenado Wa	Ku	0.4	
12 Producto de áreas (Ap calculada)	Ap	0.048816	cm ⁴
13 Dimensiones núcleo EE-2425	A	2.515	cm
	B	1.88	cm
	C	1.906	cm
	D	0.653	cm
	E	0.61	cm
	G	1.25	cm
	Ac	0.384	cm ²
	Wa	0.794	cm ²
	Ap	0.305	cm ⁴
14 Verificar Núcleo			Ap elegida > Ap calculada
15 Longitud media de la vuelta	MLT	4.9	cm
16 Área transversal	Ac	0.384	cm ²
17 Área ventana	Wa	0.794	cm ²
18 Área del carrete	wa	0.7146	cm ²
19 Área T del núcleo	At	23.5	cm ²
20 Peso del núcleo	Pfe	9.5	gramos
21 Densidad de corriente en cobre	J	349.0334081	A/cm ²
22 Área del conductor desnudo	Awb	0.002865055	cm ²
23 Calibre del alambre	AWG	21	AWG
24 Área del conductor seleccionado	Aal	0.00449977	cm ²
25 Resistencia/cm	RI	418.9	uΩ/cm
26 Área efectiva de la ventana	Waeff	0.98	cm ²
27 Número de vueltas	N	87.11556368	Vueltas
28 Entrehierro	lg	0.06781704	cm
29 Flujo de dispersión	F	1.394772922	
30 Vueltas corregidas por dispersión	Nc	73.76392157	Vueltas
31 Resistencia de la bobina	R	0.151408563	Ohms
32 Pérdidas en la bobina	Pcu	0.151408563	Watts

Tabla 5.7 Procedimiento de diseño del inductor del convertidor

Por relación de transformación y de acuerdo a la hoja de cálculo del FL7734, la bobina secundaria tendrá un número de vueltas de 75.

En resumen, el transformador del convertidor tiene las siguientes características:

Vueltas del primario: **90 calibre AWG 21**

Vueltas del secundario: **75 calibre AWG 29 (por llenado de la ventana)**

Gap o entrehierro del inductor: **0.6mm**

Núcleo: **EE-2425**

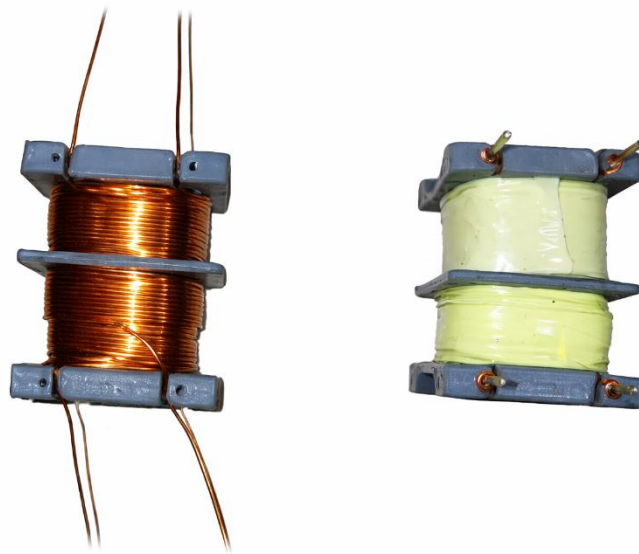


Figura 5.46 Transformador Propuesto

Para el transformador se diseñó un carrete específico de acuerdo a las dimensiones del núcleo de la ferrita. Este elemento se fabricó en impresora 3D.

El diseño se realizó en la plataforma ONSHAPE ^[30] de modelado 3D, este programa es en línea y gratuito para el sector académico. La figura 5.47 muestra el diseño.

³⁰ ONSHAPE Empresa estadounidense fundada en 2012 dedicada al desarrollo de software de diseño asistido por computadora (CAD) basado en la nube.

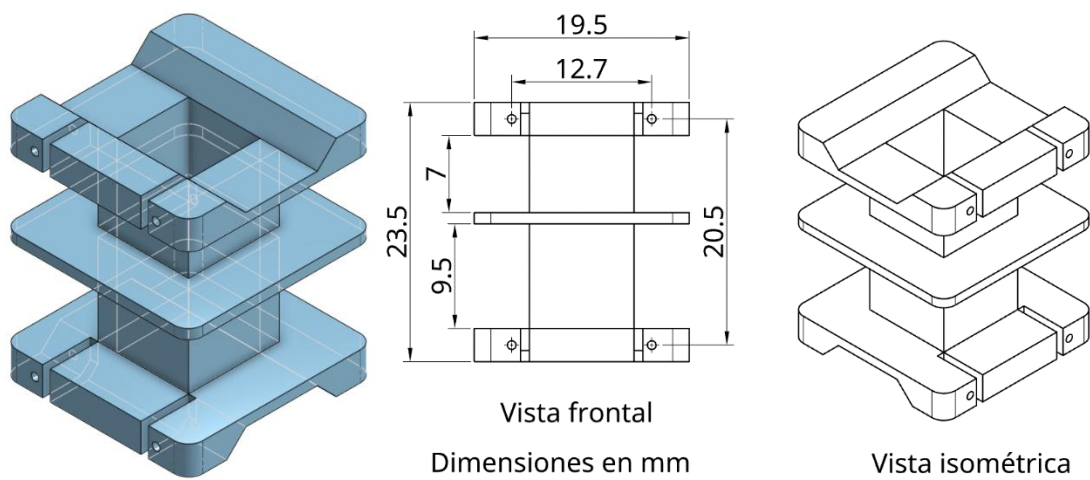


Figura 5.47 carrete para embobinados del transformador en ferrita EE 2425

Nota: El transformador diseñado se implementó, embobinando en máquina manual con contador de vueltas, como se muestra en la figura 5.46. Se le colocaron las ferritas EE y se ajustó el valor de inductancia con el GAP o entrehierro.

5.4 Diseño de circuito impreso

5.4.1 Diagrama Esquemático, ver Figura 5.48

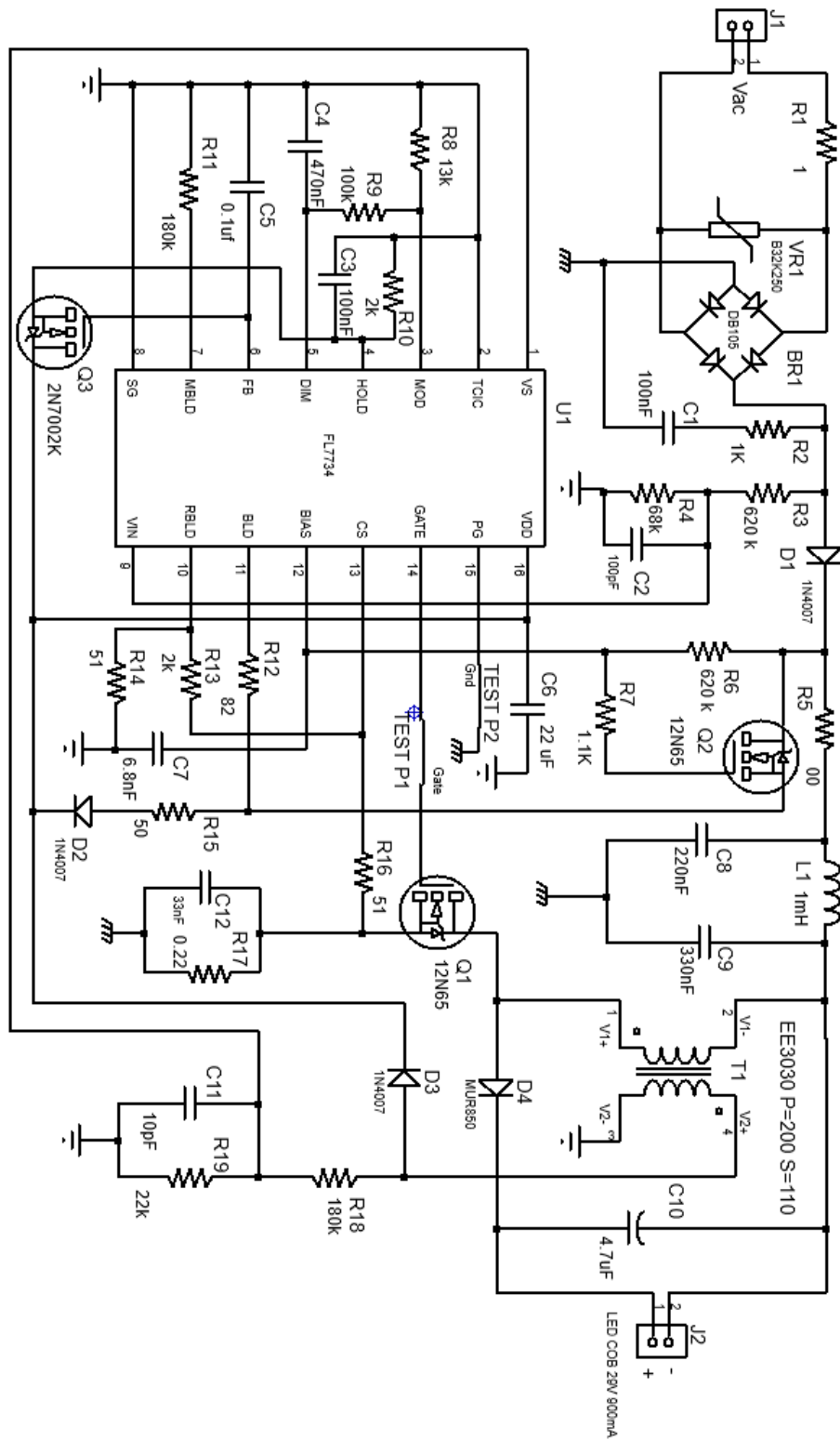


Figura 5.48 Diagrama Esquemático.

5.4.2 Diseño de Circuito PCB.

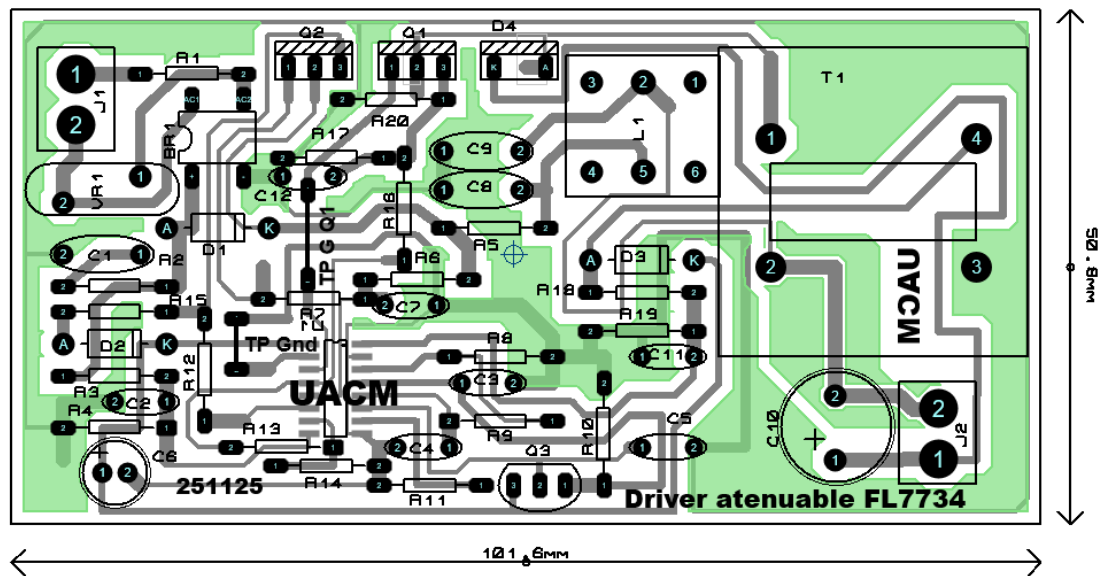


Figura 5.49 Diseño del Circuito PCB.

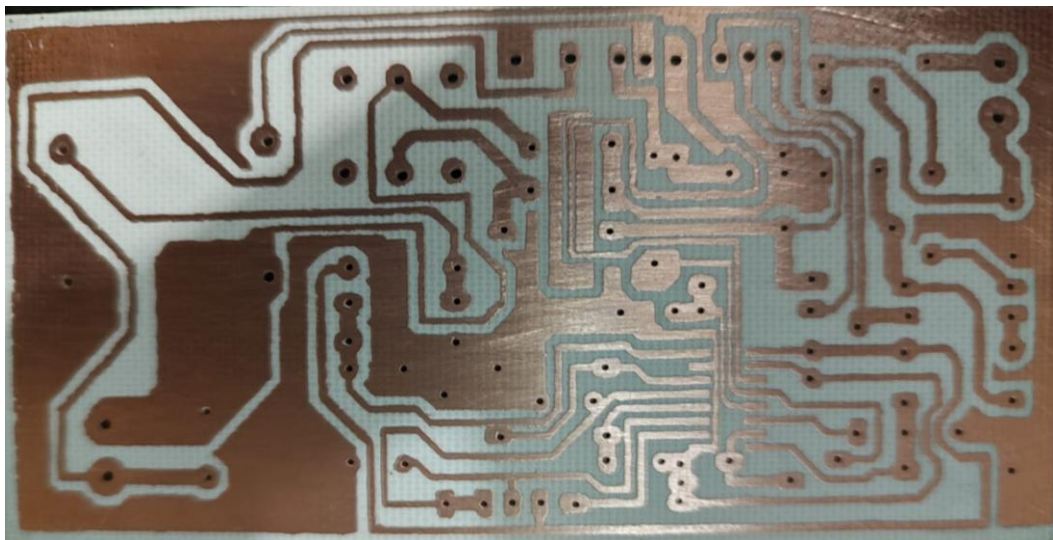


Figura 5.50 Circuito Impreso, prototipo inicial fabricado.

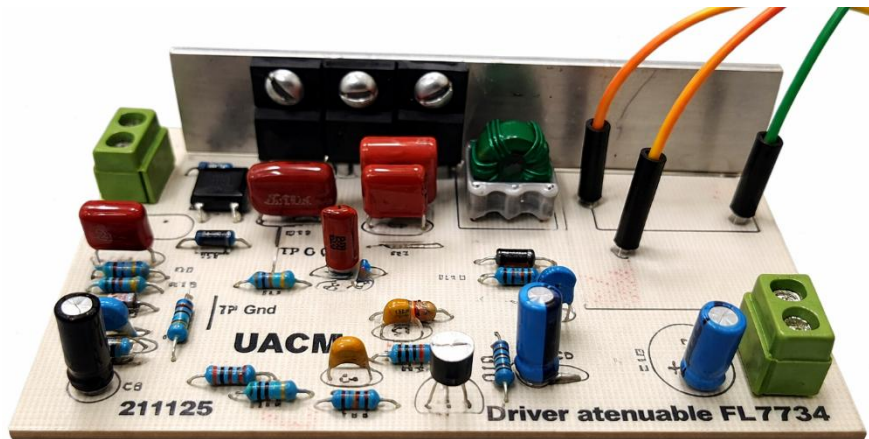


Figura 5.51 Circuito Impreso, primer prototipo.

5.5 Pruebas y resultados

Se inició con un primer prototipo en tarjeta de pruebas (protoboard), incluyó:

Primer diseño del transformador

Ensamble en Protoboard

Diseño y montaje del FL7734 en una tarjeta de impreso

Las figuras 5.52 y 5.53 muestran al transformador y el circuito en protoboard, además se muestra en la figura 5.53 la determinación de la fase del secundario del transformador.

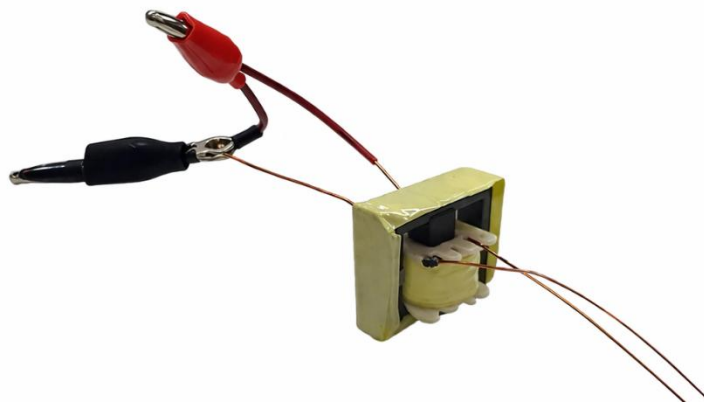


Figura 5.52 Muestra de transformador

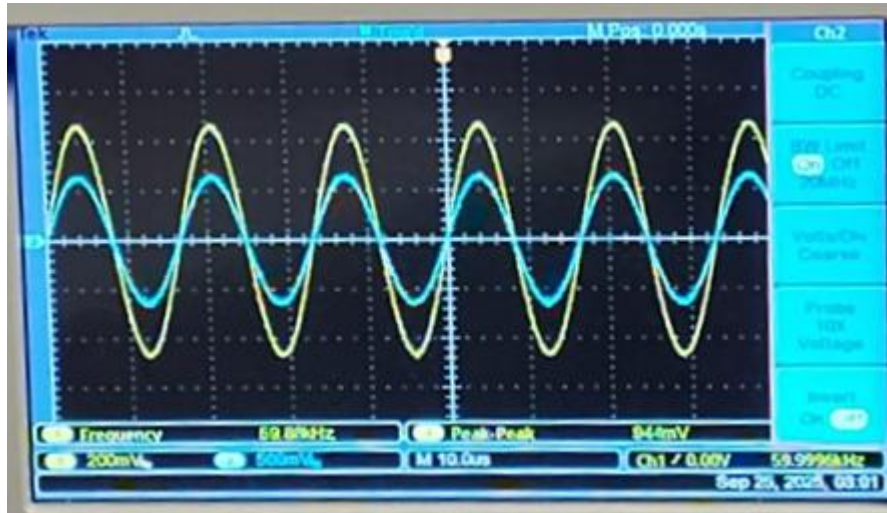


Figura 5.53 Voltajes primario y secundario del transformador, prueba de fases y relación de transformación.

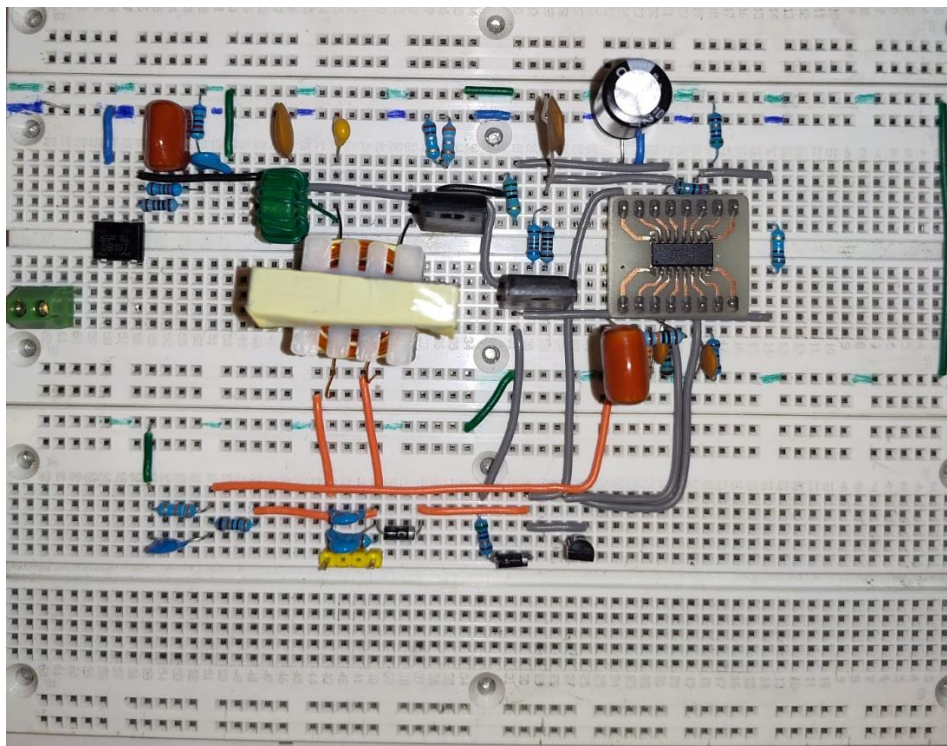


Figura 5.54 Circuito en Tarjeta de Pruebas.

Pruebas del driver propuesto y de acuerdo al diagrama de la figura 5.48, con el propósito de verificar los parámetros de entrada y salida en los dos modos de funcionamiento del sistema; es decir, con el atenuador y sin él, además probar el funcionamiento general y específico.

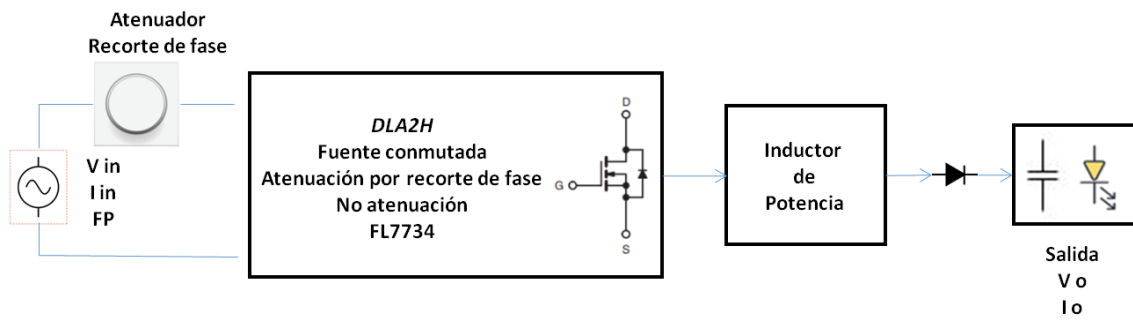


Figura 5.55 Diagrama de bloques para pruebas del driver.

5.5.1 Pruebas y resultados.

5.5.1.1 Condiciones de entrada sin atenuador (Dimmer)

Secuencia de arranque a 120V de entrada

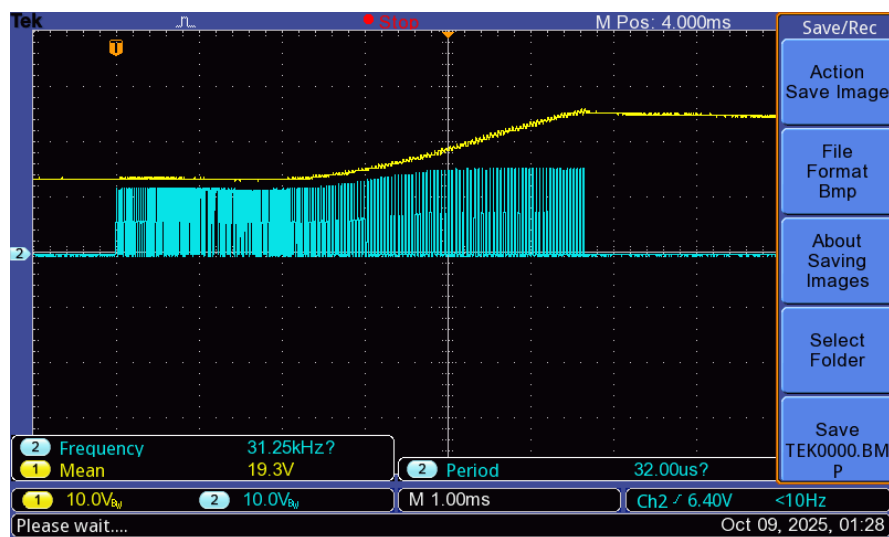


Figura 5.56 Secuencia de Arranque, Azul señal de encendido del Mosfet principal, Amarillo muestra el voltaje en terminal VDD del FL7734.

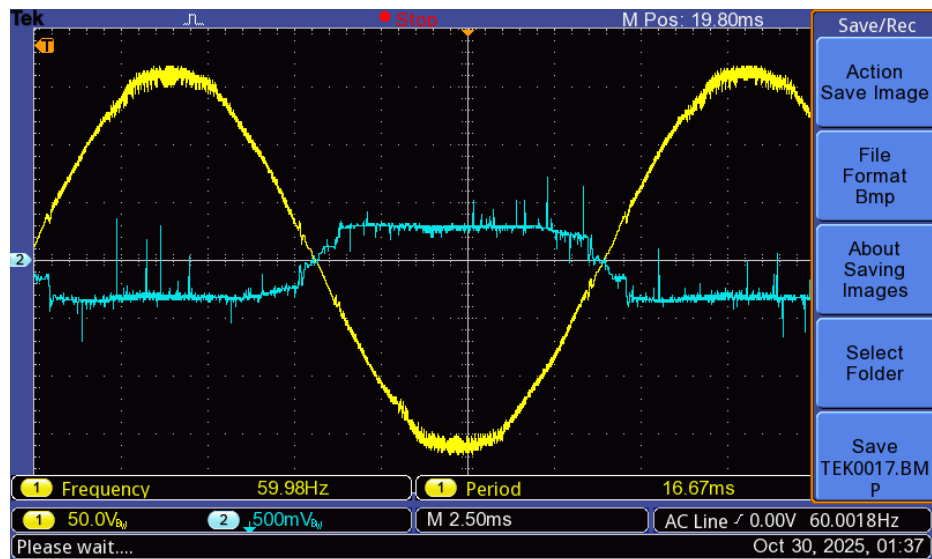


Figura 5.57 Voltaje y Corriente de entrada al driver con 114Vrms de entrada sin dimmer.



Figura 5.58 Condiciones de entrada al driver a 114v con analizador de red eléctrica.

Funcionamiento a 114Vrms de entrada, parámetros de entrada	
Voltaje de línea	114 V
Corriente	0.272 A
Potencia	0.029W
Factor de Potencia	0.96
Frecuencia	60 Hz

Tabla 5.8 Condiciones de entrada. Se observa la potencia y alto factor de potencia del sistema.

Funcionamiento a 122Vrms de entrada, parámetros de entrada	
Voltaje de línea	122 V
Corriente	0.250 A
Potencia	0.030 W
Factor de Potencia	0.92
Frecuencia	60 Hz

Tabla 5.9 Condiciones de entrada. Se observa la potencia y alto factor de potencia del sistema.



Figura 5.59 Condiciones de entrada al driver a 142V con analizador de red eléctrica.

Funcionamiento a 142Vrms de entrada, parámetros de entrada	
Voltaje de línea	142 V
Corriente	0.236 A
Potencia	0.031W
Factor de Potencia	0.94
Frecuencia	60 Hz

Tabla 5.10 Condiciones de entrada. Se observa la potencia y alto factor de potencia del sistema.

Secuencia de encendido del driver, los primeros 3 semiciclos determinan que no hay atenuador y el sistema enciende en modo sin Dimmer, entregando toda la potencia al LED y corrigiendo el factor de potencia de entrada.

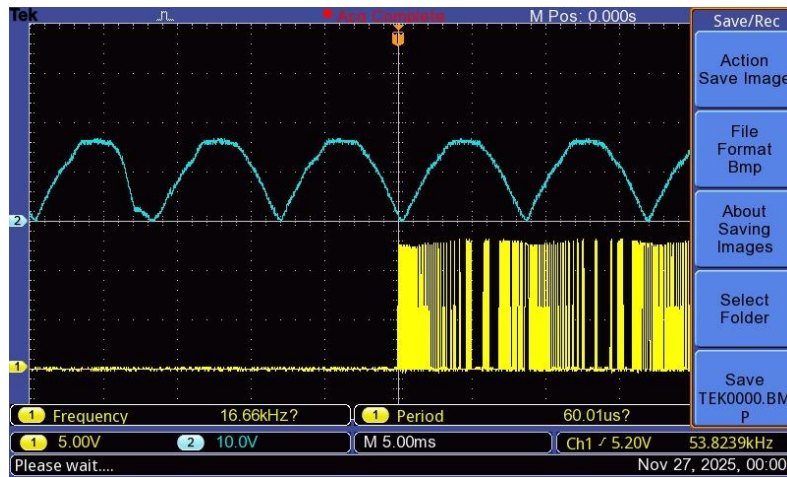


Figura 5.60 Secuencia de encendido sin dimmer, Azul terminal Vin del FL7734, Amarillo Voltaje en Gate del Mosfet principal.

Secuencia de encendido sin atenuador, después de los primeros 3 semiciclos (ver figura 5.61) y de estabilizar la fuente de alimentación VDD del FL7734, se enciende a frecuencia fija el Mosfet y corregir el factor de potencia, la figura muestra esta secuencia.

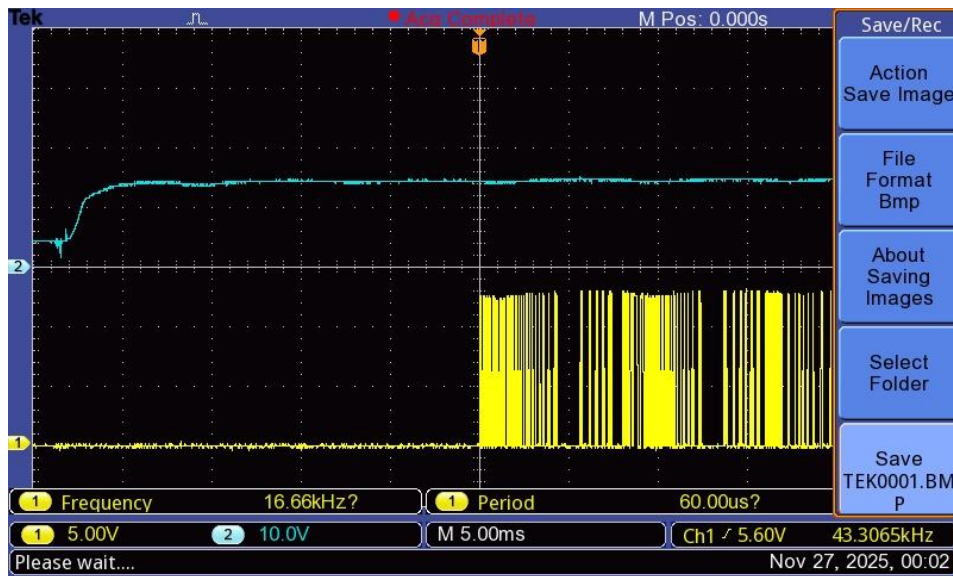


Figura 5.61 Secuencia de encendido sin atenuador. Azul terminal VDD del integrado, amarillo Gate del Mosfet principal

5.5.1.2 Condiciones de salida sin atenuador

La figura 5.62 muestra el voltaje de salida y corriente de salida, recordemos que el LED COB es de 1050mA y 29V, se observa potencia nominal en el led.

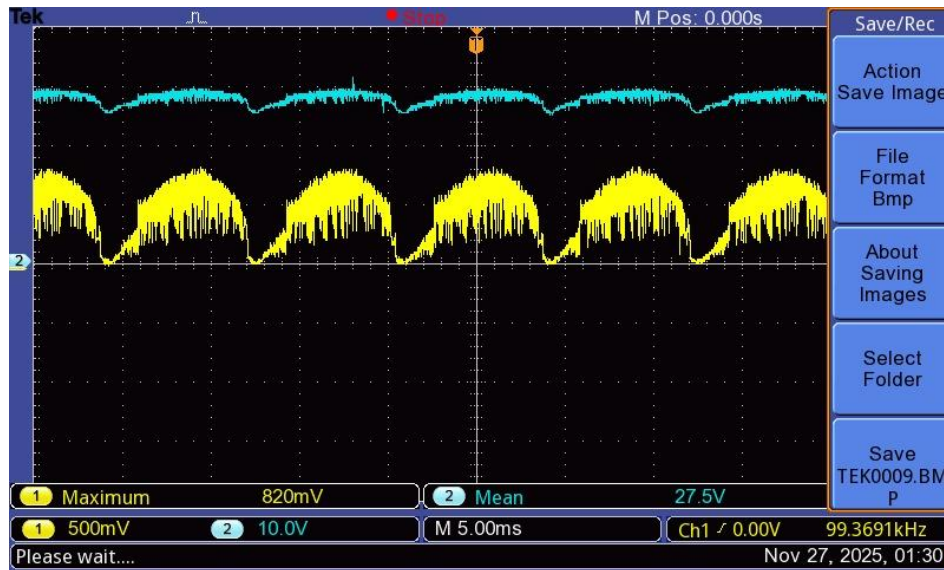


Figura 5.62 Voltaje de salida y corriente de salida a Vin de 126Vrms, azul Vled COB, amarillo Iled COB

5.5.1.3 Condiciones de entrada y salida con atenuador

Las figuras 5.63 a 5.67 muestran varias condiciones de funcionamiento del driver propuesto con el atenuador a diferentes ángulos de atenuación.

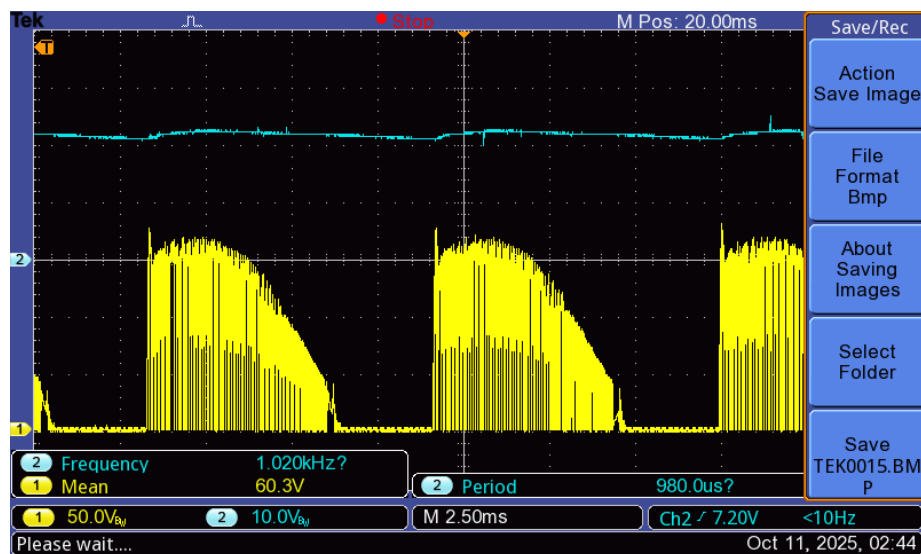


Figura 5.63 Señal de PWM en el Mosfet principal y el Voltaje de VDD del FL7734, atenuador al 70%

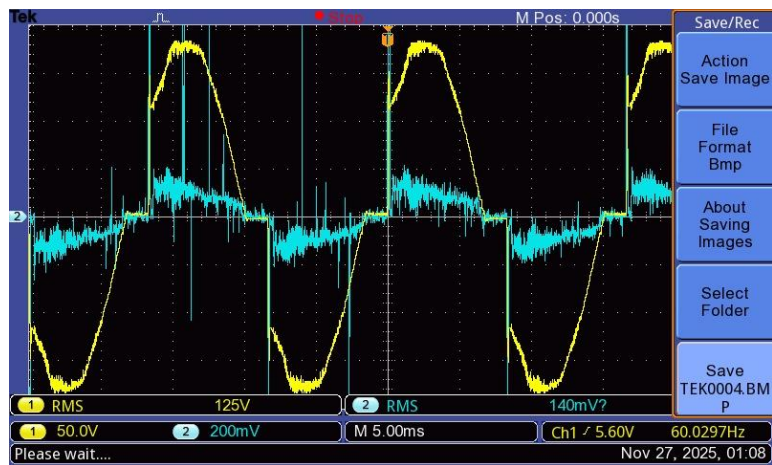


Figura 5.64 Voltaje y corriente de entrada al driver a 127V RMS con Dimmer.

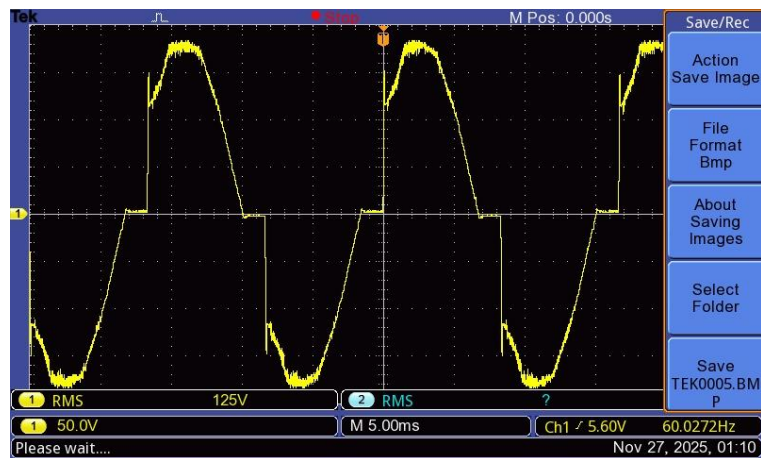


Figura 5.65 Voltaje de entrada el driver con Dimmer a 127v.

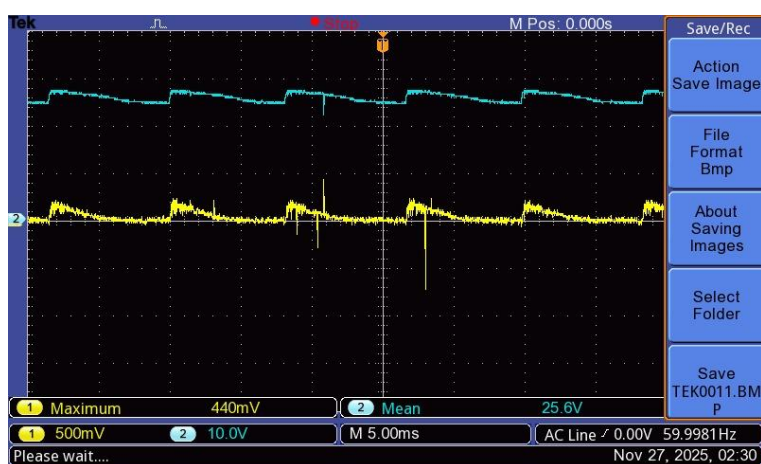


Figura 5.66 Voltaje y corriente de salida en LED con Dimmer a 122v con atenuación de 50%.

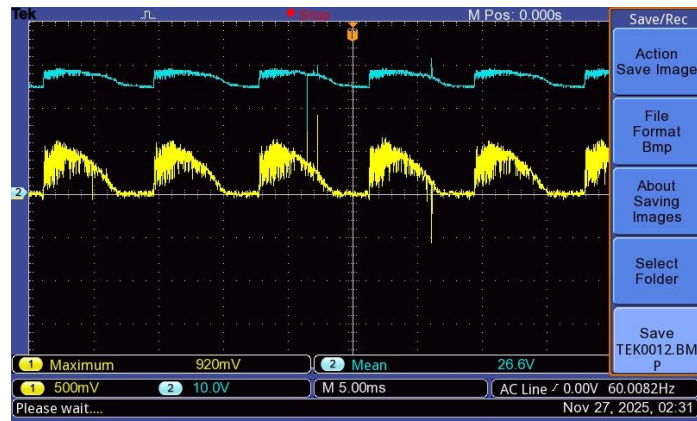


Figura 5.67 Voltaje y corriente de salida en LED con Dimmer a 122v con atenuación de 25%.

5.6 El driver DLA2H, muestra final.

Finalmente se adquirió un lote de 20 piezas del circuito impreso, fabricadas con proveedor, las figuras siguientes muestran el impreso y en ensamble final del driver.

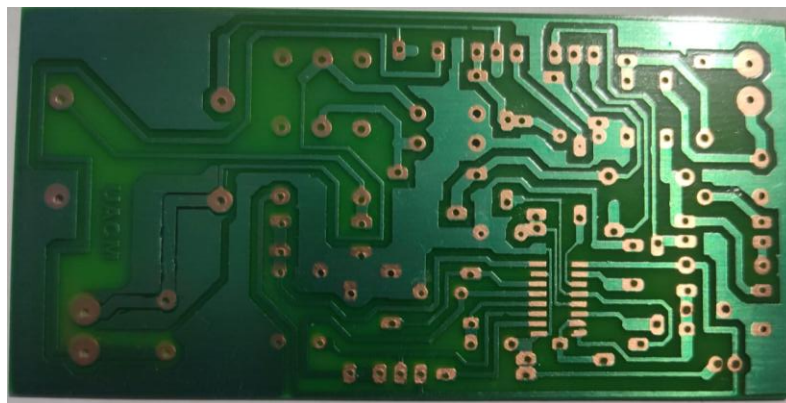


Figura 5.68 Circuito impreso fabricado, reverso.

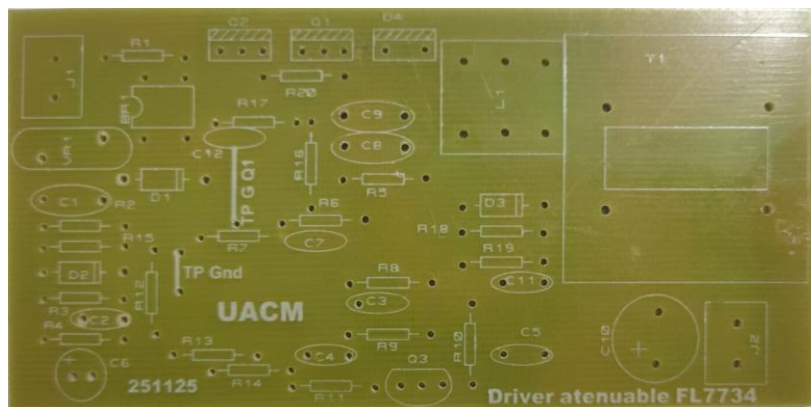


Figura 5.69 Circuito impreso fabricado, frontal.



Figura 5.70 Driver, montaje de componentes.



Figura 5.71 Driver en caja prototipo frontal.



Figura 5.72 Driver en caja prototipo reverso.

CONCLUSIONES

- El desarrollo en semiconductores y dispositivos específicos actualmente es muy abundante, áreas de aplicaciones específicas como la iluminación es de las más ampliamente aprovechadas, es evidente la importancia de la misma en el quehacer humano.
- Los fabricantes de dispositivos electrónicos anexan diversos apoyos para la aplicación de sus desarrollos; tal es el caso del dispositivo aplicado en este proyecto; además del propio integrado y sus hojas de especificaciones, el fabricante apoya con diseños típicos y procedimientos, además en este caso proporciona una hoja de cálculo Excel para interactuar.
- Con todo el apoyo mencionado se logró diseñar e implementar la fuente de potencia controlada por corriente para iluminación con LEDS propuesta. Se realizó un luminario para aplicar el diseño realizado.
- El controlador (fuente propuesta) cumple con la normatividad para estos dispositivos.
- Además de la aplicación propiamente, es vital el conocimiento de los elementos teórico-prácticos para llevar base firme en el desarrollo; los conceptos de luz, iluminación, cualidades y parámetros de la iluminación artificial, LEDS; control aplicado a fuentes luminosas, fuentes conmutadas, dispositivos de potencia y normatividad.
- La fuente propuesta cumple plenamente las funciones de transformar la corriente y adaptar la salida a los LEDS y sus especificaciones. Además, cumple la norma de corregir el factor de potencia y no excede los límites de distorsión de armónicos.
- Concluimos que se cumplieron los objetivos del plan propuesto como tema de tesis, tanto el objetivo general como los particulares.
- Durante el proceso de desarrollo se encuentran siempre problemas y retos; en este caso el hecho de que el proyecto propuesto está relacionado con la red eléctrica, es de mucho cuidado la seguridad y procedimientos de pruebas. Para lo cual utilizamos elementos e instrumentos específicos; tal como: Variac (Variador de voltaje de línea) y analizador de redes.
- Todas las sesiones de pruebas conllevan el pensamiento y razonamiento crítico para de acuerdo a las observaciones determinar resultados y realimentación para continuar el desarrollo.
- **Como propuesta de producto se requiere hacer un estudio de factibilidad, que implica costos, elementos no contemplados en este proyecto, como gabinete y luminario, además de un estudio de mercado, entre otros.**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Línea de tiempo en el desarrollo de las teorías de la luz.....	19
Figura 1.2 Definición de flujo luminoso (Φ_v Lumen) e intensidad luminosa (I_v Candela)	20
Figura 1.3 Definición de Iluminancia, un ejemplo.....	21
Figura 1.4 Temperatura de color, algunos tipos.	22
Figura 1.5 Índice de Reproducción Cromática.	22
Figura 2.1 Mecanismo de combinación de leds para producir luz blanca.....	24
Figura 2.2 Generación de luz blanca con fósforos.	25
Figura 2.3 LED de luz blanca, componentes básicos que lo forman.....	26
Figura 2.4 Diagrama de cromaticidad CIE con los colores percibidos por el ojo humano. Ejes X y Y índice de percepción del color, contorno indica la longitud de onda del color.	27
Figura 2.5 Proceso de cálculo de luminarios definido por el CIE.	28
Figura 3.1 Curva típica de funcionamiento del DIODO, un ejemplo.	31
Figura 3.2 Diagrama CIE que muestra los principales semiconductores que se usan para generar luz blanca.	31
Figura 3.3 LED COB del fabricante Bridgelux Gen 7 Vero 18 Array.....	33
Figura 3.4. Relación Corriente vs Voltaje del LED Bridgelux modelo Vero 18D [].....	34
Figura 3.5 Relación Corriente de LED vs Flujo luminoso del modelo Vero 18D,	35
Figura 3.6 Archivo fuente para generar modelo matemático de la curva de operación del LED COB	36
Figura 3.7 Modelo matemático del LED COB BXRC-30C4001-D-74	37
Figura 4.1 Diagrama general de una fuente conmutada	39
Figura 4.2 Diagrama general del Convertidor Buck.....	40
Figura 4.3. Diagrama general del Convertidor Boost.....	40
Figura 4.4. Diagrama general del Convertidor Buck-Boost.....	41
Figura 4.5 Diagrama general del Convertidor SEPIC	41
Figura 4.6 Diagrama general del Convertidor Flyback	42
Figura 4.7 Funcionamiento de la primera etapa, interruptor encendido.....	43
Figura 4.8. Segunda etapa, interruptor apagado	44
Figura 4.9 Corriente en Inductor Modo CCM, $i_L(t) > 0$ para todo t.	47
Figura 4.10 Corriente en Inductor Modo DCM, $i_L(t) = 0$ durante una parte del ciclo. 48	
Figura 4.11 Corriente en Inductor Modo BCM, $i_L(t) \rightarrow 0$ al final del ciclo.....	48
Figura 5.1 Diagrama típico de aplicación.....	60
Figura 5.2 Diagrama de bloques funcionales del FL7734.....	61
Figura 5.3 Configuración de terminales del FL7734.....	61
Figura 5.4 Secuencia de encendido del FL7734.....	64

Figura 5.5	Control de Atenuación.	66
Figura 5.6	Control del Factor de Potencia en el modo sin atenuador.....	67
Figura 5.7	Control lineal de la frecuencia	68
Figura 5.8	Circuito de protección a corto circuito en LEDs.....	69
Figura 5.9	Protección a corto circuito de la resistencia sensor.....	71
Figura 5.10	Diagrama de bloques del flujo de diseño del FL7734	73
Figura 5.11	Resumen de selección del tipo de convertidor aplicable al FL7734.....	75
Figura 5.12	Sección de especificaciones de entrada salida del convertidor.	76
Figura 5.13	Especificaciones del atenuador (Dimmer).	76
Figura 5.14	Sección de diseño del transformador en caso de Flyback atenuación amplia.	77
Figura 5.15	Sección de diseño del transformador en caso Buck-Boost atenuación amplia.	77
Figura 5.16	Diseño del circuito amortiguador (Snubber) del primario del transformador.	78
Figura 5.17	Determinación de parámetros del MOSFET y Diodo de corte en caso Flyback.	78
Figura 5.18	Determinación de parámetros del Mosfet y Diodo de corte en caso Buck- Boost.....	79
Figura 5.19	Determinación de resistencia de realimentación para el caso de Flyback. .	79
Figura 5.20	Determinación de la resistencia de realimentación, caso Buck-Boost.....	80
Figura 5.21	Señales en la terminal VS	80
Figura 5.22	Señales en MOSFET principal.....	81
Figura 5.23	Determinación de componentes de realimentación en el devanado secundario del transformador principal.	82
Figura 5.24	Determinación de componentes de corriente HOLD	82
Figura 5.25	Determinación de componentes de corriente HOLD	83
Figura 5.30	Circuito de VIN.....	85
Figura 5.39	Aplicación del FL7734 como convertidor Buck-Boost de entrada/salida amplia.	91
Figura 5.40	Especificaciones de entrada y salida del convertidor propuesto.....	92
Figura 5.41	Especificaciones del núcleo del transformador de potencia.	93
Figura 5.42	Ferrita EE	93
		94
Figura 5.43	Diagrama esquemático de Diseño Propuesto con FL7734	94
Figura 5.44	Materiales para diseño de Transformador.....	96
Figura 5.45	Dimensiones de ferritas EE, del fabricante Magnetics	99
Figura 5.46	Transformador Propuesto.....	102
Figura 5.47	carrete para embobinados del transformador en ferrita EE 2425.....	103

Figura 5.48 Diagrama Esquemático.	104
Figura 5.49 Diseño del Circuito PCB.	105
Figura 5.50 Circuito Impreso, prototipo inicial fabricado.	105
Figura 5.51 Circuito Impreso, primer prototipo.	106
Figura 5.52 Muestra de transformador	106
Figura 5.53 Voltajes primario y secundario del transformador, prueba de fases y relación de transformación.	107
Figura 5.54 Circuito en Tarjeta de Pruebas.	107
Figura 5.55 Diagrama de bloques para pruebas del driver.	108
Figura 5.56 Secuencia de Arranque, Azul señal de encendido del Mosfet principal, Amarillo muestra el voltaje en terminal VDD del FL7734.	108
Figura 5.57 Voltaje y Corriente de entrada al driver con 114Vrms de entrada sin dimmer.	109
Figura 5.58 Condiciones de entrada al driver a 114v con analizador de red eléctrica.	109
Figura 5.59 Condiciones de entrada al driver a 142V con analizador de red eléctrica.	111
Figura 5.60 Secuencia de encendido sin dimmer, Azul terminal Vin del FL7734, Amarillo Voltaje en Gate del Mosfet principal.	112
Secuencia de encendido sin atenuador, después de los primeros 3 semiciclos (ver figura 5.61) y de estabilizar la fuente de alimentación VDD del FL7734, se enciende a frecuencia fija el Mosfet y corregir el factor de potencia, la figura muestra esta secuencia.	112
Figura 5.61 Secuencia de encendido sin atenuador. Azul terminal VDD del integrado, amarillo Gate del Mosfet principal.	112
Figura 5.62 Voltaje de salida y corriente de salida a Vin de 126Vrms, azul Vled COB, amarillo Iled COB	113
Figura 5.63 Señal de PWM en el Mosfet principal y el Voltaje de VDD del FL7734, atenuador al 70%	113
Figura 5.64 Voltaje y corriente de entrada al driver a 127V RMS con Dimmer.	114
Figura 5.65 Voltaje de entrada el driver con Dimmer a 127v.	114
Figura 5.66 Voltaje y corriente de salida en LED con Dimmer a 122v con atenuación de 50%.	114
Figura 5.67 Voltaje y corriente de salida en LED con Dimmer a 122v con atenuación de 25%.	115
Figura 5.68 Circuito impreso fabricado, reverso.	115
Figura 5.69 Circuito impreso fabricado, frontal.	115
Figura 5.70 Driver, montaje de componentes.	116
Figura 5.71 Driver en caja prototipo frontal.	116
Figura 5.72 Driver en caja prototipo reverso.	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Especificaciones del modelo BXRC-30C4001-D-74.....	33
Tabla 3.2. Valores de Voltaje-Corriente para generar el modelo matemático del LED, algunos puntos de operación.	35
Tabla 3.3 Valores de Flujo luminoso-Corriente para generar el modelo matemático del LED, puntos de operación.	35
Tabla 5.1 Descriptiva de las terminales del FL7734	62
Tabla 5.2 Selección del tipo de convertidor, si se requiere atenuación amplia.	73
Tabla 5.3 Selección del tipo de convertidor si se requiere entrada/salida amplia.	74
Tabla 5.4 Componentes del diseño del FL7734	95
Tabla 5.5 Dimensiones para ferritas EE (cm), Magnetics.....	100
Tabla 5.6 Propiedades magnéticas para ferritas EE del fabricante Magnetics.....	100
Tabla 5.7 Procedimiento de diseño del inductor del convertidor	101
Tabla 5.8 Condiciones de entrada. Se observa la potencia y alto factor de potencia del sistema.	110
Tabla 5.9 Condiciones de entrada. Se observa la potencia y alto factor de potencia del sistema.	110
Tabla 5.10 Condiciones de entrada. Se observa la potencia y alto factor de potencia del sistema.	111
ÍNDICE DE TABLAS.....	121

BIBLIOGRAFÍA

1. David, A., & Whitehead, L. A. (2018). LED-based white light. *Comptes Rendus Physique*, 19(3), 169–181.
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.02.004>
2. Feezell, D., & Nakamura, S. (2018). Invention, development, and status of the blue light-emitting diode, the enabler of solid-state lighting. *Comptes Rendus Physique*, 19(1), 113–133.
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.12.001>

3. Fontoynt, M. (2018). LED lighting, ultra-low-power lighting schemes for new lighting applications. *Comptes Rendus Physique*, 19(2), 159–168.
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.014>
4. Pattison, P. M., Hansen, M., & Tsao, J. Y. (2018). LED lighting efficacy: Status and directions. *Comptes Rendus Physique*, 19(2), 134–145.
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>
5. Weisbuch, C. (2018). Historical perspective on the physics of artificial lighting. *Comptes Rendus Physique*, 19(2), 89–112.
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.03.001>
6. Hecht, E. (2002). *Óptica* (4ª ed.). Pearson Educación.
7. Tipler, P. A., & Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología* (Vol. 2). Reverté.
8. McLyman, W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook* (3rd ed.). Kg Magnetics, Inc.
9. Einstein, A. (1905). On a heuristic point of view about the creation and conversion of light. *Annalen der Physik*, 17, 132–148.
<https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>
10. García Díaz, D. (2015). Estudio de fósforos de iluminación de LED blanco por técnicas de espectroscopia óptica resuelta en tiempo (Tesis de licenciatura). Universidad de Alcalá.
11. Texas Instruments. (2014). TPS92410 Switch-Controlled, Direct Drive, Linear Controller for Offline LED Drivers. <https://www.ti.com/product/TPS92410>
12. CENIDET. Diseño de elementos magnéticos en alta frecuencia. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias en ingeniería electrónica. Ing. Roger Efrain Carrillo de Cuernavaca Morelos, México diciembre 2004.