

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
para iluminación con leds blancos
con driver inteligente (Smart lighting)**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
**LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS
ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES**

P R E S E N T A

JACOB VELÁZQUEZ DE JESÚS

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:

Licenciado David Velázquez Suárez

Secretario: Grado, Nombre completo e Institución.

Maestro Gabriel Eloy Aguilar Pineda

Vocal: Grado, Nombre completo e Institución.

Licenciado Agustín Ortiz Castro

DIRECTOR DE TESIS

David Velázquez Suárez

Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Nacional Autónoma de México

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Mis agradecimientos están dedicado a mi familia, profesores y amigos que me guiaron, acompañándonos y por su apoyo moral que nos brindaron a lo largo de la carrera con su apoyo se pudo lograr terminar una etapa importante de mi vida. Dicha investigación fue un reto importante, con todo lo que me enseñaron los profesores y que nos compartieron sus conocimientos para lograr el proyecto final.

El diseño de ingeniería se ha definido como “[...] el proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficientes detalles que permitan su realización.

[...] 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”

“Ingeniería es encontrar una solución donde no hay solución”

CONTENIDO

RESUMEN	4
OBJETIVO GENERAL	5
OBJETIVO PARTICULARES	5
JUSTIFICACIÓN	6
CAPÍTULO I LUZ, ILUMINACIÓN, CONCEPTOS GENERALES	8
1.1 Aspectos generales sobre luz natural y artificial	9
1.2 Definiciones, características de la luz emitida por fuentes artificiales.....	10
1.2.1 Cantidad de luz	10
1.2.2 Intensidad luminosa (candela)	10
1.2.3 Nivel de iluminación o iluminancia (lux).....	11
1.2.4 Temperatura de Color.....	12
1.2.5 Rendimiento de color o índice de reproducción cromática (IRC).....	13
CAPÍTULO II LA TECNOLOGÍA DE LUZ CON DIODOS EMISORES (<i>LEDS</i>)	15
2.1 La tecnología de luz con diodos emisores	16
2.2. Mecanismos para producir luz blanca con LEDS	17
2.3 Principios de funcionamiento del LED, el semiconductor.	18
2.4 El sistema integrado entre semiconductor y encapsulado del LED.....	20
2.5 LED de luz blanca	26
2.6 El sistema de color CIE (Comisión Internacional de Iluminación en francés)	29
CAPITULO III DIODOS Y CONTROL DE LEDS. VOLTAJE O CORRIENTE.....	36
3.1 Principios de funcionamiento del diodo	37
3.2 Tipos de diodos.....	37
3.3 Algunas funciones de los diodos	38

3.4 Regiones o curvas de funcionamiento del diodo	39
3.5 Regiones de operación de los diodos LED de luz blanca y su control por corriente	43
3.5.1 LED CREE serie 3030.....	43
3.5.2 LED Bridgelux COB	44
CAPITULO IV CONTROLADORES INTELIGENTES PARA ILUMINACIÓN CON LEDS (DRIVERS)	46
4.1 Antecedentes. Fuentes conmutadas, tipos	47
4.1.2 Tipos de fuentes conmutadas básicas	50
4.1.3 Convertidor reductor Buck	51
4.1.4 Convertidor elevador Boost.....	55
4.1.5 Convertidor reductor-elevador	57
4.2 Ventajas y desventajas de las fuentes conmutadas	60
4.3 El factor de potencia y la normatividad en las fuentes conmutadas,	61
4.4 Fabricantes de DRIVERS para LEDS, algunos ejemplos	66
4.4.1 Fabricante: Power Integrations.....	66
4.4.2 Fabricante: IXYS.....	72
4.5 Selección del driver a implementar	77
CAPITULO V IMPLEMENTACIÓN.....	92
5.1 Procedimiento de diseño recomendado por el fabricante ONSEMI.....	93
5.2 Especificaciones del driver	94
5.3 Diseño del inductor.....	96
5.4 Diseño del inductor considerando su funcionamiento a altas frecuencias	101
5.5 Filtro EMI.....	103
5.6 Diseño de circuitos, Impreso para el integrado FL7701 y del driver completo	107
5.6.1 Circuito impreso:	107

5.6.2 Diagrama esquemático:	108
5.6.3 Lista de materiales	109
5.6.4 Luminario, partes constitutivas: Perfil de aluminio, Regleta de LEDS, Driver, Soporte de montaje.	109
5.7 Pruebas y resultados	112
CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO	121
ÍNDICE DE FIGURAS	123
ÍNDICE DE TABLAS	126
BIBLIOGRAFÍA	127

RESUMEN

Para este proyecto que implica áreas de luz, iluminación, electrónica de potencia, normatividad, entre otras. Iniciamos en el capítulo I documentando sobre los conceptos generales de iluminación, como son: Luz natural y luz artificial, temperatura de color, el Índice de Rendimiento de Color (IRC)[1]. En el capítulo II veremos la tecnología de luz con diodos emisores (LEDS)[2], el mecanismo para reproducir la luz blanca mediante sistema RGB[3] y mediante semiconductores encapsulados en fósforos; asimismo documentamos sobre la composición de semiconductores y encapsulado del diodo LED, la eficiencia luminosa, los materiales que componen la luz blanca y por último se verá el diagrama de cromaticidad CIE[4]. En el capítulo III abordamos el dispositivo electrónico denominado

[¹] IRC es una medida de la calidad de reproducción cromática que tienen las fuentes de luz artificiales

[²] LED, Lighting Emitter Diode, Diodo Emisor de Luz, dispositivo semiconductor que emite luz

[³] RGB, sistema compuesto de tres LEDS que emiten en Rojo, Verde y Azul.

[⁴] CIE Diagrama de cromaticidad, Comisión Internacional de Iluminación en francés, caracteriza los colores por un parámetro de luminancia Y, y dos coordenadas de color x e y.

diodo, su principio de operación, curva de funcionamiento, modelo matemático, posteriormente hablamos de dos diodos emisores de luz blanca, su curva de operación y sus modelos obtenidos en Matlab[5], de las marcas CREE[6] y Bridgelux[7]. En el capítulo IV analizaremos los tipos de fuentes conmutadas, su principio de operación, ventajas y desventajas de las fuentes conmutadas, el factor de potencia y, unos ejemplos de fabricantes de dispositivos electrónicos para el control de fuentes luminosas de luz blanca [drivers]; finalmente en este capítulo definimos el dispositivo que se va a usar para la propuesta objetivo de este proyecto. En el capítulo V a partir de los apoyos y especificaciones del fabricante ONSEMI [8] realizamos la propuesta de la fuente conmutada, diseñamos las partes constitutivas y especificaciones del mismo, diseñamos un circuito impreso y un luminario con una regleta de LEDS; aquí mismo reportamos los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones y posibles mejoras y trabajos a futuro.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar una fuente de potencia controlada para sistemas de iluminación con LEDS, para diferentes usos; doméstico, comercial, oficina, entre otros. El controlador (fuente propuesta) debe cumplir con la normatividad de estos dispositivos y con componentes electrónicos de control de reciente desarrollo.

OBJETIVO PARTICULARES

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

[⁵] Matlab, Es una plataforma de programación y computación numérica utilizada para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos.

[⁶] CREE, LED Marca Registrada, 2025 Cree LED, a Penguin Solutions brand. All rights reserved

[⁷] Bridgelux, Bridgelux LED Marca Registrada

[⁸] ONSEMI, es una empresa estadounidense proveedora de semiconductores.

- ° Realizar una investigación sobre el desarrollo de la iluminación con LEDS, desde los aspectos históricos hasta los nuevos desarrollos tecnológicos para generar luz en el espectro visible con LEDS.
- ° Investigar y documentar sobre las técnicas de control de los dispositivos de LEDS. Investigar y documentar sobre las Fuentes conmutadas en la electrónica de potencia.
- ° Documentar sobre los dispositivos de control 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, documentar sus principios de funcionamiento y procedimientos para diseñar una aplicación. Definir y proponer una aplicación, diseñar e implementar la fuente propuesta.

JUSTIFICACIÓN

Como muchas áreas del conocimiento humano, que se han ido desarrollando de acuerdo a las necesidades cada día mayores en la sociedad, el área de iluminación no natural también ha requerido de nuevo conocimiento y desarrollo tecnológico. La sociedad ha caminado desde la iluminación con fuego, velas, combustibles, pasando por la electricidad; esta última transcurrió por más de un siglo, los avances se fueron dando en mejorar eficiencia y nuevos métodos de conversión de la electricidad a flujo luminoso; en ella se desarrollaron la incandescencia, la fluorescencia, la descarga eléctrica en un tubo con mezcla de gases y metales y otras formas. Hoy día se tiene la mejor iluminación artificial creada por el hombre.

El flujo luminoso producto de la corriente eléctrica que fluye en la unión P-N de semiconductores que liberan fotones, uniones que forman los LEDS. En estos dispositivos electrónicos para liberar fotones en la unión P-N se utilizan elementos semiconductores específicos como el Galio, Silicio entre otros más.

Para el correcto funcionamiento de un sistema o tira de LEDS es importante la fuente de voltaje/corriente de control de las condiciones del LED. La gran mayoría de los luminarios o tiras LEDS no se conectan directamente a la energía eléctrica, para funcionar necesitan de una fuente que les entregue las condiciones óptimas de funcionamiento. Su función es transformar el voltaje de entrada adaptándolo a las especificaciones del sistema LED.

Una fuente de voltaje no sólo debe cumplir las funciones principales de transformar la corriente y adaptar la salida hacia la fuente luminosa o tira LEDS para que éste pueda conectarse a la energía y funcionar, también, debe protegerlo de factores inesperados en la alimentación, como transitorios, altas, bajas de voltaje, problemas de instalación.

Las fuentes de potencia también han evolucionado para ofrecer alternativas cada vez más eficientes, con características capaces de potencializar al máximo las cualidades de un luminario o tira LEDS y, al mismo tiempo, beneficiar al usuario permitiéndole ahorrar costos y procesos de instalación. Estos importantes dispositivos eran equipos grandes, pesados y que complicaban las labores de instalación, aumentaban los costos, la planeación y ejecución en las obras.

Ahora, las fuentes brindan ventajas hasta estéticas y practicidad siendo mucho más pequeñas y ligeras, incluso, algunas poseen accesorios de sujeción que aumentan la productividad en su instalación. Así mismo, las fuentes han ganado mayor versatilidad al ofrecer alternativas de baja y alta potencia; contienen incluso elementos “inteligentes” como sensores de temperatura, de corto circuito, entre otros.

Por lo redactado anterior se justifica el presente proyecto, dirigido al diseño e implementación de un controlador (driver) inteligente para sistemas de luz artificial con LEDS, con la tecnología y elementos de vanguardia; que presente alta eficiencia, bajos costos y cumplimiento de normas.

CAPÍTULO I LUZ, ILUMINACIÓN, CONCEPTOS GENERALES

1.1 Aspectos generales sobre luz natural y artificial

La luz natural es aquella luminosidad que proviene directa o indirectamente de fuentes naturales, particularmente del sol. Por eso se le conoce también como luz diurna, luz del día o luz solar. La luz solar más brillante tiene una intensidad de alrededor de 120000 lux a nivel de la superficie terrestre (unidad del Sistema Internacional para medir el nivel de iluminación y determinada por Lúmenes/m²), pudiendo descender a unos 20000 lux en caso de días nublados al mediodía. [i] En este mismo capítulo abordaremos las definiciones y parámetros de iluminación.

Otras fuentes de luz natural son los relámpagos, el fuego (siempre que no sea provocado por el humano) y algunos animales dotados de bioluminiscencia, o sea, de generar luz a partir de la superficie de sus cuerpos. Sin embargo, la luz de las antorchas y las velas (a pesar de provenir del fuego), no se suele considerar luz natural, ya que en su elaboración ha intervenido el ser humano.

La luz artificial se define para este proyecto como la que se obtiene de fuentes no naturales, producidas por el ser humano de manera explícita o indirecta. La principal y más importante forma de luz artificial, que se obtiene a través del manejo de la electricidad, como es el caso de la luz emitida por incandescencia de las lámparas de filamento (focos).

Una de las principales fuentes de luz artificial que desarrolló el ser humano con la electricidad, fue haciendo circular una corriente eléctrica a lo largo de un filamento metálico (formado con tungsteno), dentro de un contenedor de vidrio al vacío.

Existen diferentes formas tecnológicas para generar luz artificial con la electricidad, dependiendo de la tecnología puntual con que opere el sistema: luz incandescente, luz fluorescente, luz incandescente en medios con halógeno, los diodos semiconductores emisores de luz (que trataremos en el capítulo II), entre otras tecnologías.

1.2 Definiciones, características de la luz emitida por fuentes artificiales

1.2.1 Cantidad de luz

El flujo luminoso, medido en lúmenes (abreviatura lm), es la potencia de radiación emitida por una fuente luminosa. Indica la cantidad de luz que emite en todas las direcciones.

Para comparar la luminosidad de diferentes lámparas, hay que fijarse en el flujo luminoso. La unidad **lumen** es una unidad de medida normalizada internacionalmente para el flujo luminoso de una fuente de luz.

El valor del lumen no tiene en cuenta la percepción de la luminosidad. La percepción de la luminosidad se ve influida por el ángulo del haz de luz y el diseño del luminario, intervienen en esta percepción otros parámetros como la temperatura de color de la fuente de luz, su índice de rendimiento de color (de las cuales hablaremos posteriormente), además la naturaleza del entorno. [ii]

1.2.2 Intensidad luminosa (candela)

Describe la radiación de flujo luminoso emitido en una dirección determinada. La intensidad luminosa es una de las magnitudes fotométricas, relaciona el flujo luminoso (Φ_v) con el ángulo del haz en una dirección determinada, definida en estereorradianes. El estereorradián (símbolo: sr) es la unidad derivada del Sistema Internacional de unidades que mide ángulos sólidos. Es el equivalente tridimensional del radián. El estereorradián(sr) se define haciendo referencia a una esfera de radio $r = 1$ m. Si el área de una porción de esta esfera es r^2 , un estereorradián es el ángulo sólido comprendido entre esta porción y el centro de la esfera, como se muestra en la figura 1.1.

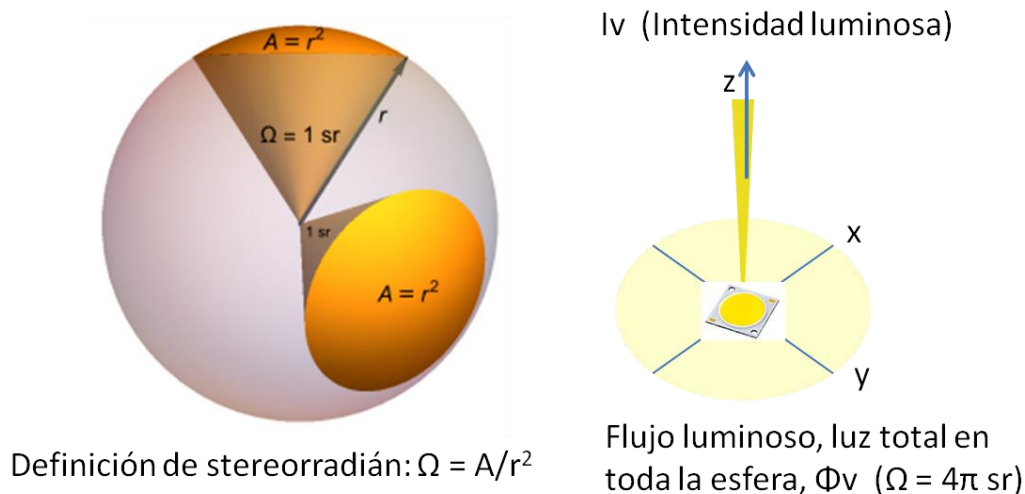


Figura 1.1 Definición de flujo luminoso (Φ_v Lumen) e intensidad luminosa (I_v Candela)

Por lo tanto, es la concentración de la luz o la densidad de la luz emitida en una determinada dirección.

1.2.3 Nivel de iluminación o iluminancia (lux)

Lux proporciona información sobre la iluminancia. Es una medida de la luminosidad (lumen) con la que se alumbra una zona. El lux^[9] indica la cantidad de flujo luminoso (lumen) de una fuente de luz que llega por unidad de superficie a un receptor. El valor lux es una cantidad puramente receptora. La iluminancia se calcula mediante la siguiente fórmula: Lux [lx] = flujo luminoso [lm] / superficie [m²].

La iluminancia es de 1 lux cuando un flujo luminoso de 1 lumen incide uniformemente sobre una superficie de 1 m². De acuerdo a la fórmula: Si nos alejamos de la fuente luminosa en la misma dirección donde medimos la iluminancia, esta disminuye en relación cuadrática, así que, para calcular la iluminancia a mayores distancias es la siguiente: Lux [lx] = intensidad luminosa [cd] / radio o distancia al cuadrado.

Cuanto a más distanciada esté la superficie de la fuente de luz, menor será la iluminancia. El valor de lux determinado sirve para evaluar si ciertas superficies están suficientemente iluminadas, tal evaluación se realiza por diseñadores de iluminación de espacios, para

[9] Unidad de medida Sistema Internacional

determinar cantidades de iluminancia de acuerdo a la actividad a realizarse en los espacios. La Figura 1.2 muestra la iluminancia.

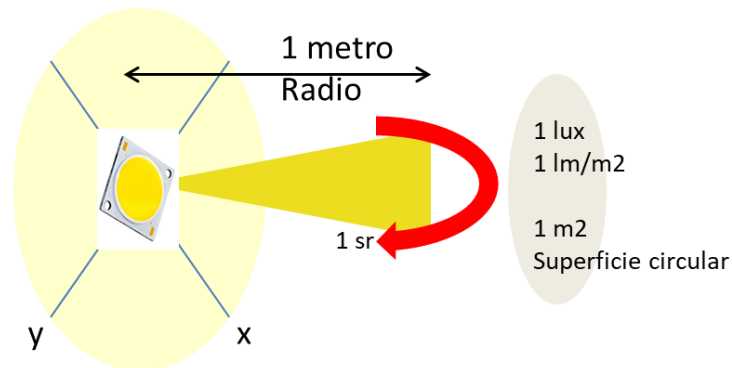


Figura 1.2 Definición de Iluminancia, un ejemplo.

1.2.4 Temperatura de Color

Es una medida relacionada con el color que presenta un cuerpo negro ideal al calentarse, es decir, es una correlación o símil. Por este motivo se mide en K (Kelvin).

El color de la luz o la temperatura del color varía desde los 2200 K hasta los 7000 K, lo que permite aplicaciones diversas de acuerdo al ambiente que se quiera proporcionar. Comúnmente se manejan 3 ambientes, la luz cálida está en una tonalidad que se encuentra por debajo de los 3300 K, que proporciona una calidez ambiental; en el otro extremo está la luz fría, cuya medida está entre 5000 y 6500 K; por otro lado, la emisión alrededor de 4000 K se considera luz neutra o natural, que produce sensación de limpieza y frescura.

Cada tonalidad de luz LED tiene un uso apropiado según el ambiente y la sensación que deseamos causar. La luz cálida es ideal cuando se quieren crear ambientes acogedores. La luz fría se utiliza sobre todo en lugares donde hay mucho movimiento de paso y en zonas especialmente oscuras. En tanto que, la luz neutra es la más parecida a la luz natural del día. Eso la hace idónea para iluminación general de todo tipo de salas y lugares de trabajo.

Blanco cálido: Si lo que se requiere es tener un lugar iluminado con un ambiente conveniente para la relajación y el descanso, como habitaciones, salas de estar, comedor, entre otros, el blanco cálido es lo más recomendable.

Blanco frío: El blanco frío se caracteriza por crear un ambiente más estimulante, debido a sus tonos azulados. Por esto, se recomienda para áreas donde se realizan las primeras actividades diarias, como el cuarto de baño o para ciertas zonas de la cocina, áreas que mantienen y requieren un tránsito continuo, como pasillos y escaleras o la entrada del hogar. Es también muy utilizada en estacionamientos y hospitales, en el ámbito más profesional. Se consideran frías las fuentes de iluminación con una temperatura del color por encima de los 5.000 grados Kelvin.

Blanco neutro: En locales comerciales y oficinas es preferible el uso del blanco neutro. Éste realza los colores y produce efecto de alta animosidad en las personas, lo que, se puede traducir en mayor venta y/o rendimiento de los empleados. En el hogar lo podemos utilizar en salas de estudio y lectura o como iluminación general.

Es recomendable usar una combinación de las diferentes temperaturas del color para lograr distintos efectos. En el caso particular de la cocina o del baño, la combinación de luz neutra y luz fría, crea un ambiente propicio que estimula, pero relaja a la vez. Lo ideal, en estos casos, es usar la tonalidad cálida en los techos o paredes y la azulada o fría en pantallas, lámparas de pie o sobre mesas en general. De igual manera, se recomienda la combinación para locales comerciales según el efecto que se desee causar en el visitante.

Sin lugar a dudas, por sus diferentes cualidades, actualmente se debe usar iluminación LED, ya que son más eficientes, ahorrativas, de mayor vida, y otras ventajas. Según los requerimientos y necesidades pueden usarse en simulación de lámparas incandescentes, downlights, plafones, proyectores, paneles, entre otros. Existen productos que incluyen varias temperaturas de color en una misma aplicación. De esta manera, se puede modificar la temperatura y ambiente de acuerdo a las necesidades de cada momento en un único producto. Generalmente cuentan con un control o driver para modificar la tonalidad, permitiendo una iluminación personalizable.

1.2.5 Rendimiento de color o índice de reproducción cromática (IRC)

El índice de reproducción cromática indica la exactitud en la que la luz reproduce los colores de los objetos. Por lo tanto, los objetos iluminados los vemos con el color real. Un IRC que esté arriba de 90 indica que los colores se reproducen 90% de los reales; el rojo aparece rojo

intenso y no parece como mate. La iluminación LED con IRC superior a 90 se usa normalmente para aplicaciones como talleres de impresión, áreas de pintado de coches e industria gráfica, así como en tiendas de ropa.

IRC en lámparas LED: Las primeras lámparas LED tenían IRC bajos, de entre 60 y 69. Actualmente, la tecnología LED en iluminación ha progresado mucho y es capaz de ofrecer los IRC más altos, comprendidos entre 80-89 y 90-95. Por este motivo, la calidad de la iluminación LED con respecto a la reproducción del color está garantizada.

Diferencias entre el IRC y el Índice de Temperatura de Color: en este punto es importante diferenciar el IRC con el Índice de Temperatura de Color: La temperatura del color se cuantifica en unidades de medida Kelvin y sus valores determinan la calidez de una lámpara, mientras que el IRC determina que tan fielmente la luz artificial reproduce el color de los objetos iluminados.

CAPÍTULO II LA TECNOLOGÍA DE LUZ CON DIODOS EMISORES (*LEDs*)

2.1 La tecnología de luz con diodos emisores

En las últimas décadas se ha producido una serie de revoluciones tecnológicas, en particular en el ámbito digital, que han cambiado radicalmente muchos aspectos de nuestra vida cotidiana. La creciente carrera entre los fabricantes de diodos emisores de luz (LED) promete producir, literalmente, la transición más visible y de mayor alcance hasta la fecha. Los recientes avances en el diseño y la fabricación de estos dispositivos semiconductores en miniatura van a provocar la obsolescencia de las otras formas de iluminación artificial, es probablemente el dispositivo con mayor presencia de la sociedad moderna. [iii]

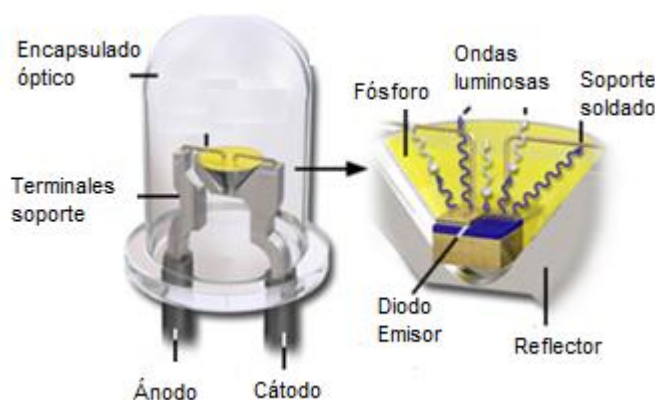


Figura 2.1 Partes integrantes del LED emisor de luz blanca

Aunque los diodos emisores de luz están en funcionamiento en todas partes, como en los magnetoscopios, los relojes despertadores y los hornos de microondas, su uso se ha limitado principalmente a las funciones de visualización de los aparatos electrónicos. Las pequeñas luces indicadoras rojas y verdes de computadoras y otros dispositivos son tan familiares que probablemente no se reconozca ampliamente que los primeros LEDS se limitaban a emitir una luz roja de baja intensidad. De hecho, incluso la disponibilidad de diodos emisores de luz verde representó un importante paso en el desarrollo de la tecnología.

En los últimos años, los LEDS se han vuelto mucho más potentes y están disponibles en un amplio espectro de colores. Un avance que permitió la fabricación del primer LED azul a principios de los años 90, que emitía luz en el extremo opuesto del espectro de luz visible del

rojo, abrió la posibilidad de crear prácticamente cualquier color de luz. Más importante aún, el descubrimiento hizo técnicamente posible producir luz blanca a partir de los diminutos dispositivos semiconductores. Una versión económica y de mercado masivo del LED blanco ha permitido que sea el dispositivo que terminará con la dependencia de cien años de lámparas incandescentes ineficientes. Como muestra la figura 2.1

El uso generalizado de dispositivos de diodos para la iluminación general es una realidad actualmente, los LED están han sustituido a las lámparas incandescentes y fluorescentes en muchas aplicaciones. Hay varias razones de tal sustitución de las fuentes de luz convencionales por alternativas de semiconductores modernas. Los diodos emisores de luz son mucho más eficientes en flujo luminoso/Watts a la hora de convertir la electricidad en luz visible, son resistentes, compactos y suelen durar 100,000 horas de uso, o unas 100 veces más que las incandescentes.

2.2. Mecanismos para producir luz blanca con LEDS

A medida que se han realizado mejoras en la eficiencia de fabricación y en la capacidad de producir diodos emisores de luz con prácticamente cualquier color de salida. En este caso la luz blanca, se están empleando dos mecanismos principales para producir esta luz blanca a partir de dispositivos que son fundamentalmente monocromáticos, y es muy probable que ambas técnicas sigan utilizándose para diferentes aplicaciones. Un método implica mezclar diferentes colores de luz de varios LEDS, o de diferentes materiales en un solo LED, en proporciones que dan como resultado una luz que parece blanca, el sistema RGB ^[10] es un ejemplo. La segunda técnica se basa en el uso de la emisión de LED (comúnmente ultravioleta no visible) para proporcionar energía para la excitación de otra sustancia, como un fósforo, que a su vez produce luz blanca. Como muestra en la figura 2.2. Cada método tiene ventajas y desventajas que probablemente estén en constante cambio a medida que se produzcan nuevos avances en la tecnología LED.

^[10] RGB, acrónimo del inglés Red Green Blue, Rojo Verde Azul

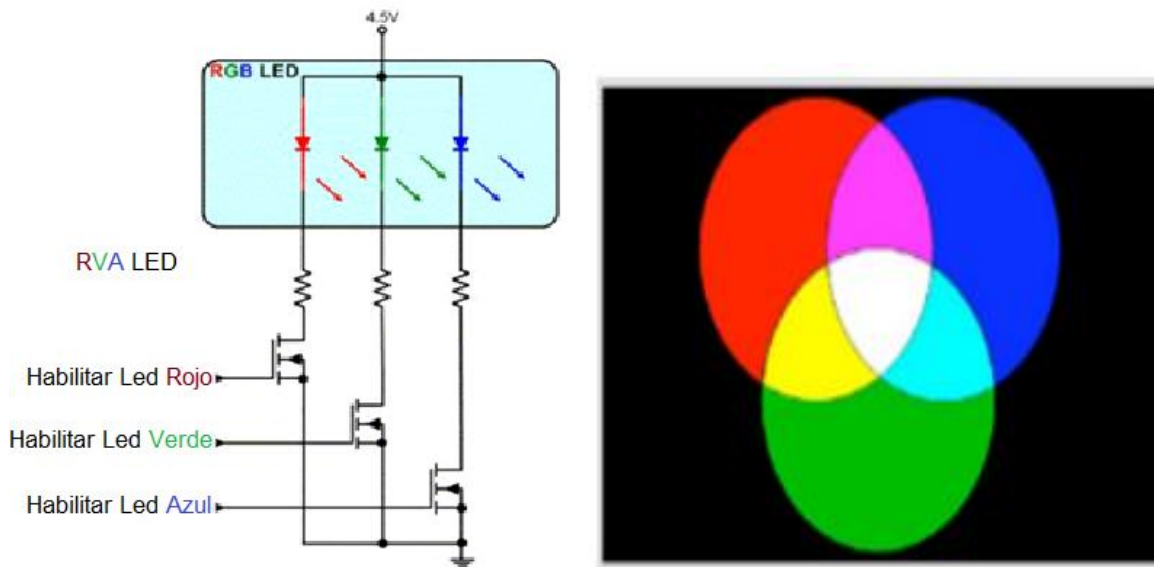


Figura 2.2 Esquema interno del RGB y de lado derecho Luz blanca producida por los colores rojo, verde y azul

2.3 Principios de funcionamiento del LED, el semiconductor.

Los detalles funcionales del diodo emisor de luz se basan en propiedades comunes a los materiales semiconductores, como el silicio, que tienen características de conducción variables. Para que un sólido conduzca electricidad, su resistencia debe ser lo suficientemente baja como para que los electrones se muevan más o menos libremente por todo el volumen del material. Los semiconductores presentan valores de resistencia eléctrica intermedios entre los de los conductores y los aislantes, y su comportamiento se puede modelar en términos de la teoría de bandas para sólidos. En un sólido cristalino, los electrones de los átomos constituyentes ocupan una gran cantidad de niveles de energía que pueden diferir muy poco en energía o en número cuántico. El amplio espectro de niveles de energía tiende a agruparse en bandas de energía casi continuas, cuyo ancho y espaciamiento difieren considerablemente para diferentes materiales y condiciones.

La banda de energía se refiere al rango de niveles de energía que los electrones pueden ocupar en un material, Se compone principalmente de la Banda de Valencia VB (llena de electrones ligados) y la Banda de Conducción CB (vacía, donde los electrones se mueven libremente), separadas por una estrecha brecha prohibida E_g , como muestra la figura 2.3

Los semiconductores tienen brechas de Banda prohibida pequeñas pero finitas y, a temperaturas normales, la agitación térmica o lumínica es suficiente para mover algunos electrones a la Banda de conducción, donde pueden contribuir a la conducción eléctrica. La resistencia se puede reducir aumentando la temperatura, pero muchos dispositivos semiconductores están diseñados de tal manera que la aplicación de un voltaje produce los cambios necesarios en la distribución de electrones entre las bandas de valencia y conducción para permitir el flujo de corriente. Aunque la disposición de las bandas es similar para todos los semiconductores, existen grandes diferencias en la brecha de Banda (y en la distribución de electrones entre las bandas) en condiciones de temperatura específicas.

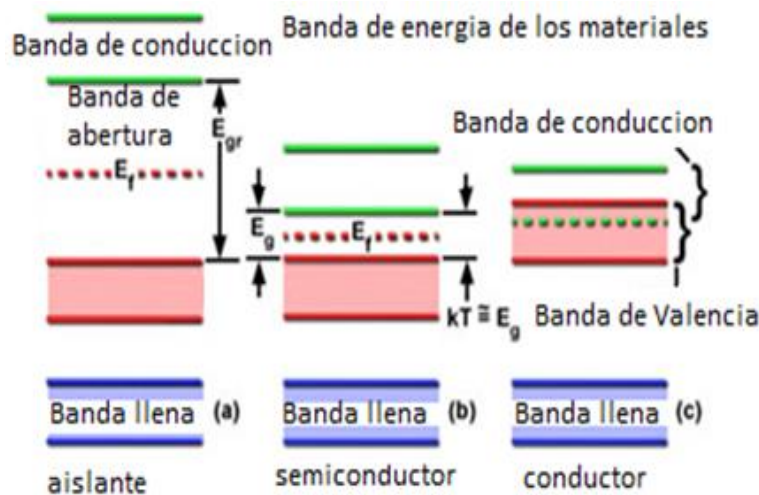


Figura 2.3 Bandas de energía de los semiconductores.

La manipulación de la interacción entre electrones y huecos en la unión p-n es fundamental en el diseño de todos los dispositivos semiconductores, y en el caso de los diodos emisores de luz, el objetivo principal del diseño es la generación eficiente de luz. La inyección de portadores a través de la unión p-n va acompañada de una caída de los niveles de energía de los electrones desde la banda de conducción a los orbitales inferiores. Este proceso tiene lugar en cualquier diodo, pero solo produce fotones de luz visible en aquellos que tienen composiciones de material específicas.

En un diodo de silicio estándar, la diferencia de nivel de energía es relativamente pequeña y solo se produce emisión de baja frecuencia, predominantemente en la región infrarroja del espectro. Los diodos infrarrojos son útiles en muchos dispositivos, incluidos los controles

remotos, pero el diseño de diodos emisores de luz visible requiere la fabricación con materiales que presenten una brecha más amplia entre la banda de conducción y los orbitales de la Banda de valencia. Todos los diodos semiconductores liberan algún tipo de luz, pero la mayor parte de la energía es absorbida por el propio material del diodo a menos que el dispositivo esté diseñado específicamente para liberar los fotones externamente. Además, para ser útiles como fuente de luz, los diodos deben concentrar la emisión de luz en una dirección específica. Tanto la composición como la construcción del chip semiconductor y el diseño de la carcasa del LED contribuyen a la naturaleza y eficiencia de la emisión de energía del dispositivo.

2.4 El sistema integrado entre semiconductor y encapsulado del LED

Para la creación de los encapsulados de LED, se incrustan partículas de vidrio diminutas en el epoxi^[11] encapsulado. La difusión creada por la inclusión del vidrio difunde la luz emitida por el diodo, lo que produce un ángulo de visión de aproximadamente 35 grados a cada lado del eje central. Este estilo de lente se emplea comúnmente en aplicaciones en las que el LED se ve directamente, como en las lámparas indicadoras de los paneles de los equipos.

La elección de los sistemas de materiales y las técnicas de fabricación en la construcción de LED se guía por dos objetivos principales: ***la maximización de la generación de luz en el material del semiconductor y la extracción eficiente de la luz generada***. En la unión P-N polarizada directamente, se inyectan agujeros a través de la unión desde la región P hacia la región N, y se inyectan electrones desde la región N hacia la región P. La distribución de portadores de carga de equilibrio en el material se altera mediante este proceso de inyección, que se conoce como inyección de portadores minoritarios y su recombinación en los flujos da lugar a una eficiencia denominada cuántica (relacionado con la cantidad de fotones emitidos por estas recombinaciones).

La elección de materiales para la fabricación de LED se basa en una comprensión de la estructura de la banda de semiconductores y los medios por los cuales se pueden elegir o manipular los niveles de energía para producir valores favorables de eficiencia cuántica.

^[11] Epoxi o epóxico, resina polimérica endurecida, se caracteriza por sus propiedades eléctricas

Ciertos grupos de compuestos III-V tienen eficiencias cuánticas internas de casi el 100 por ciento, mientras que otros compuestos utilizados en semiconductores pueden tener eficiencias cuánticas internas tan bajas como el 1 por ciento.

Las eficiencias cuánticas que presentan los LEDS fabricados con los dos tipos de material semiconductor reflejan claramente este hecho. Los LEDS de Nitruro de Galio tienen eficiencias cuánticas de hasta el 12 por ciento, en comparación con el 0.02 por ciento típico de los LED de carburo de silicio.

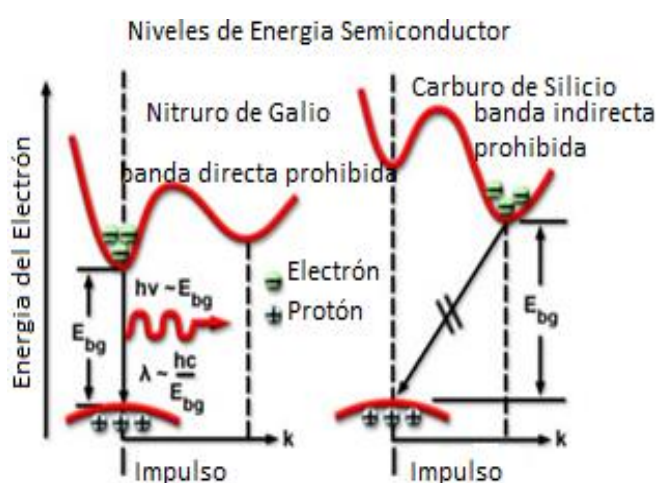


Figura 2.4 Niveles energéticos de los materiales semiconductores para LEDS

Como se ha comentado anteriormente, la maximización de la generación de luz en el material semiconductor del diodo es un objetivo principal de diseño en la fabricación de LED. Otro requisito es la extracción eficiente de la luz. Debido a la reflexión interna total, solo una fracción de la luz que se genera de forma isotrópica dentro del chip ^[12] semiconductor puede escapar al exterior. Según la ley de Snell, la luz puede viajar desde un medio de índice de refracción más alto a un medio de índice de refracción más bajo solo si intersecta la interfaz entre los dos medios en un ángulo menor que el ángulo crítico para los dos medios. En un semiconductor emisor de luz típico que tiene forma cúbica, solo alrededor del 1 al 2 por ciento de la luz generada escapa a través de la superficie superior del LED (dependiendo del

^[12] Chip, pieza pequeña de material semiconductor, combinación de semiconductores que forman al LED en este caso.

chip específico y la geometría de la unión p-n), y el resto se absorbe dentro de los materiales semiconductores.

La proporción de luz emitida desde un chip LED hacia el entorno depende de la cantidad de superficies a través de las cuales se puede emitir luz y de la eficacia con la que esto ocurre en cada superficie. Casi todas las estructuras LED se basan en algún tipo de disposición en capas en la que se utilizan procesos de crecimiento denominado epitaxial para depositar varios materiales con la misma estructura reticular uno encima del otro para adaptar las propiedades del chip. Se emplea una amplia variedad de estructuras, y cada sistema de materiales requiere una arquitectura de capas diferente para optimizar las propiedades de rendimiento.

La mayoría de los diseños estructurales de los LEDs se basan en un paso de crecimiento secundario para depositar una capa monocristalina sobre un material de sustrato monocristalino de crecimiento masivo. Este enfoque de múltiples capas permite a los diseñadores satisfacer requisitos aparentemente contradictorios o inconsistentes. Una característica común de todos los tipos estructurales es que la unión p-n, donde se produce la emisión de luz, casi nunca se encuentra en el cristal del sustrato de crecimiento masivo. Una razón para esto es que el material de crecimiento masivo generalmente tiene una alta densidad de defectos, lo que reduce la eficiencia de generación de luz. Además, los materiales de crecimiento masivo más comunes, incluidos el arseniuro de galio, el fosfuro de galio y el fosfuro de indio, no tienen el intervalo de banda adecuado para las longitudes de onda de emisión deseadas. Como se muestra la figura 2.4. Otro requisito en muchas aplicaciones de LEDs, es una resistencia en serie baja que se puede cumplir con la elección del sustrato adecuado, incluso en casos en los que el bajo dopaje requerido en la región de la unión p-n no proporcionaría una conducción adecuada.

Las técnicas de crecimiento epitaxial de cristales implican la deposición de un material sobre otro, que tiene constantes de red atómicas y coeficientes de expansión térmica muy similares para reducir los defectos en el material estratificado. Se utilizan varias técnicas para producir capas epitaxiales. Entre ellas se encuentran la epitaxial en fase líquida (LPE), la epitaxial en fase de vapor (VPE), la deposición química en fase de vapor epitaxial metal orgánica

(MOCVD) y la epitaxial por haz molecular (MBE). Cada una de las técnicas de crecimiento tiene ventajas en sistemas de materiales o entornos de producción particulares,

Aunque normalmente no contiene la región de unión p-n, el material del sustrato del LED se convierte en una parte integral de la función y se elige para que sea apropiado para la deposición de las capas epitaxiales deseadas, así como para su transmisión de luz y otras propiedades. Como se muestra la figura 2.5. Como se indicó anteriormente, la fracción de luz generada que realmente se emite desde un chip LED es una función del número de superficies que transmiten luz de manera efectiva. La mayoría de los chips LED se clasifican como dispositivos de sustrato absorbente (AS), donde el material del sustrato tiene un intervalo de banda estrecho y absorbe todas las emisiones que tienen una energía mayor que el intervalo de banda. Por lo tanto, la luz que viaja hacia los lados o hacia abajo se absorbe, y dichos chips solo pueden emitir luz a través de sus superficies superiores.

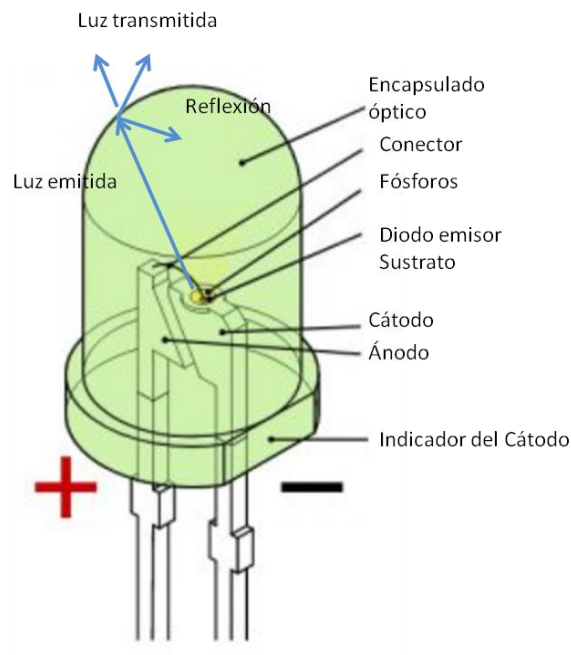


Figura 2.5 La integralidad entre LED emisor de luz y su encapsulado

Más recientemente, se han desarrollado LEDs azules basados en materiales de Nitruro de Galio y Carburo de Silicio. La producción de luz en esta región de longitud de onda más corta y más energética del espectro visible ha sido durante mucho tiempo un desafío para los diseñadores de LEDs. Las altas energías de los fotones generalmente aumentan la tasa de

fallas de los dispositivos semiconductores, y la baja sensibilidad del ojo humano a la luz azul se suma al requisito de “brillo” para un diodo azul útil. Uno de los aspectos más importantes de un diodo emisor de luz azul es que completa la familia de colores primarios rojo, verde y azul (RGB) para proporcionar un mecanismo adicional de producción de luz blanca en estado sólido, a través de la mezcla de estos componentes. La Tabla 2.1 muestra en resumen los componentes utilizados para LEDS de luz artificial.

COMPUESTO	COLOR	LONGITUD DE ONDA
Arseniuro de Galio (Ga As)	Infrarrojo	940nm
Arseniuro de Galio y Aluminio (Al Ga As)	Rojo e Infrarrojo	680nm
Fosfuro de Arseniuro de Galio (Ga As P)	Rojo, naranja y amarillo	630nm
Fosfuro de Galio (Ga P)	Verde	555nm
Nitruro de Galio (Ga N)	Verde	525nm
Seleniuro de Zinc (Zn Se)	Azul	
Nitruro de Galio (Ga N)	Azul	450nm
Carburo de Silicio (Si C)	Azul	480nm
Diamante (C)	Ultravioleta	
Silicio (Si)	En desarrollo	

Tabla 2.1 Emisores de diferentes colores de luz para LEDS.

Los investigadores del estado sólido han buscado desarrollar una fuente de luz azul brillante desde el desarrollo de los primeros diodos emisores de luz. Aunque los LEDS que utilizan carburo de silicio pueden producir luz azul, tienen una eficiencia luminosa extremadamente baja y no son capaces de producir el brillo necesario para aplicaciones prácticas. Los desarrollos en semiconductores basados en Nitruros del Grupo III han llevado a una revolución en la tecnología de diodos.

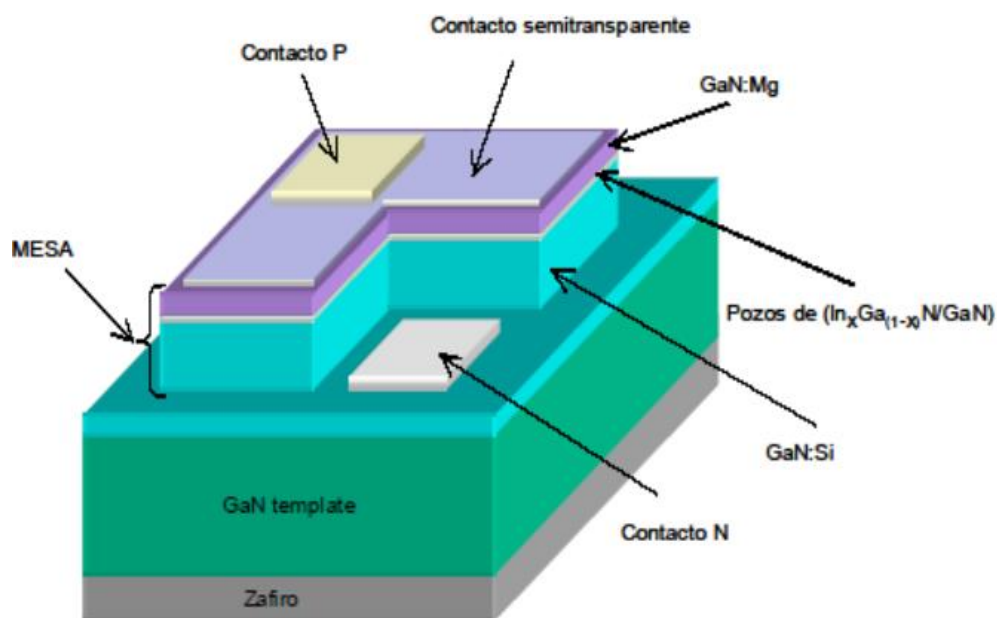


Figura 2.6 Ejemplo de estructura de semiconductores de un diodo emisor para luz blanca.

En particular, el sistema de Nitruro de Galio-Indio (Ga In N) es el principal para la producción de LED azules, y también es un material primario en el mercado en desarrollo de LED blancos. El sistema de material Ga In N evolucionó en la década de 1990 con el logro del p-dopaje en Ga N , seguido más tarde por la utilización de la hetero estructura doble Ga In N/Ga N para la fabricación de LED, y luego por la disponibilidad comercial de LED Ga In N azules y verdes de alto brillo a fines de la década de 1990. La figura 2.6 muestra las eficiencias de las diferentes tecnologías de producción de luz artificial en la historia, además muestra la frecuencia de emisión de los semiconductores utilizados para LEDS.

Eficiencia luminosa, tabla comparativa, lámparas y diferentes tipos de LEDS

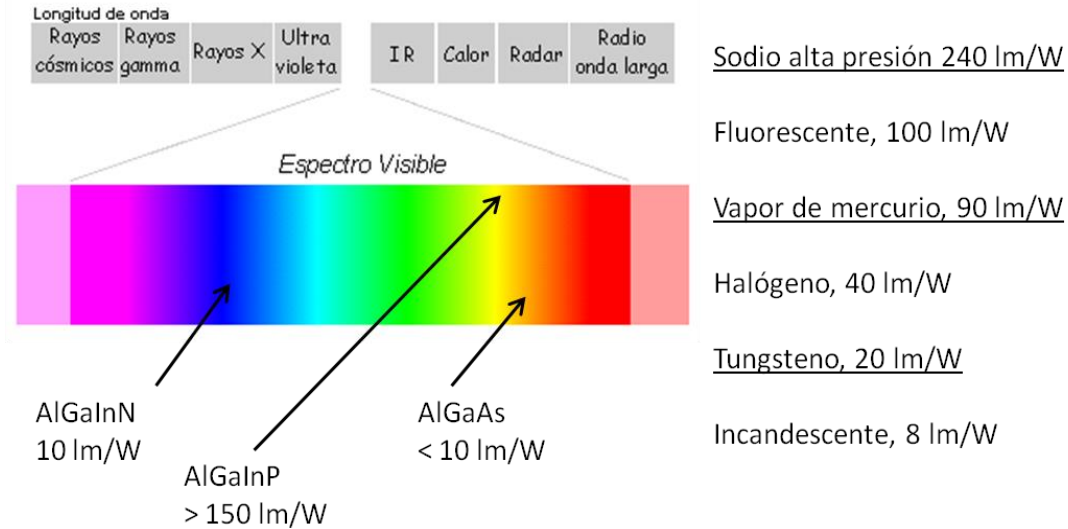


Figura 2.7 Eficiencia luminosa de las tecnologías de luz artificial, histórico.

2.5 LED de luz blanca

El papel del sistema de material semiconductor de Nitruro de Indio-Galio se extiende al desarrollo de diodos de luz blanca. La adición de LED de emisión azul brillante a los dispositivos rojos y verdes desarrollados anteriormente hace posible utilizar tres LED, ajustados a niveles de salida adecuados, para producir cualquier color en el espectro de luz visible, incluido el blanco. Otros enfoques posibles para producir luz blanca, utilizando un solo dispositivo, se basan en convertidores de longitud de onda de fósforo o colorante o convertidores de longitud de onda de semiconductores.

El concepto de un LED blanco es particularmente atractivo para la iluminación general, debido a la confiabilidad y larga vida útil de los dispositivos de estado sólido. Además, el potencial para ofrecer una eficiencia luminosa muy alta en comparación con las fuentes incandescentes y fluorescentes convencionales, se puede observar de la figura 2.7 el semiconductor AlGaInP.

Mientras que las fuentes de luz convencionales exhiben una salida promedio de 15 a 100 lúmenes por watt, se predice que la eficiencia de los LEDS blancos alcanzará más de 300 lúmenes por watt mediante un desarrollo continuo.

Los LEDS blancos son ciertamente adecuados para aplicaciones de visualización y señalización, pero para que sean útiles en la iluminación general (como se ha alcanzado) y para aplicaciones que exigen una reproducción precisa y estéticamente agradable del color (incluida la iluminación para microscopía óptica), debe considerarse seriamente la manera en que se logra la luz "blanca" para la percepción del ser humano: **El ojo humano**, percibe la luz como blanca si los tres tipos de células cónicas foto sensoriales, ubicadas en la retina, se estimulan en proporciones particulares, para lo cual se desarrolló el sistema de color CIE (Comisión Internacional de Iluminación, en francés), del cual hablamos posteriormente.

Los tres tipos de conos presentan curvas de respuesta que alcanzan su pico de sensibilidad en longitudes de onda que representan el rojo, el verde y el azul, y la combinación de estas señales de respuesta produce diversas sensaciones de color en el cerebro. Una amplia variedad de diferentes mezclas de colores es capaz de producir un color percibido similar, especialmente en el caso del blanco, que puede lograrse mediante muchas combinaciones de dos o más colores.

Otro medio para generar luz blanca es combinar la emisión de tres colores que producirán la percepción de luz blanca cuando se combinen en la proporción de potencia adecuada. La luz blanca también se puede producir mediante la emisión de banda ancha de una sustancia que emite sobre una gran región del espectro visible. Este tipo de emisión se aproxima a la luz solar y se percibe como blanca. Además, la emisión de banda ancha se puede combinar con la emisión en líneas espectrales discretas para producir un blanco percibido, que puede tener características de color deseables particulares que difieren de las de la luz blanca producida por otras técnicas.

La combinación de diodos rojos, verdes y azules en un paquete discreto, o en un conjunto de lámparas que alberga un grupo de diodos, permite la generación de luz blanca o cualquiera de los 256 colores mediante el uso de circuitos que controlan los tres diodos de forma independiente. En aplicaciones que requieren un espectro completo de colores a partir de una única fuente puntual, este tipo de formato de diodo RGB es la técnica preferida.

La mayoría de los diodos de luz blanca emplean un chip semiconductor que emite a una longitud de onda corta (azul, violeta o ultravioleta) y un convertidor de longitud de onda, que

absorbe la luz del diodo y experimenta una emisión secundaria a una longitud de onda más larga. Por lo tanto, dichos diodos emiten luz de dos o más longitudes de onda que, cuando se combinan, aparecen como blancas. La calidad y las características espectrales de la emisión combinada varían con las diferentes variaciones de diseño que son posibles.

Los materiales convertidores de longitud de onda más comunes se denominan fósforos, que exhiben luminiscencia cuando absorben energía de otra fuente de radiación. Los fósforos que se utilizan normalmente están compuestos de una sustancia huésped inorgánica que contiene un dopante ópticamente activo. El granate de itrio y aluminio (YAG) es un material anfitrión común y, para aplicaciones de diodos, generalmente se lo dopa con uno de los elementos de tierras raras o un compuesto de tierras raras. El cerio es un elemento dopante común en los fósforos YAG diseñados para diodos emisores de luz blanca.

Las contribuciones relativas de las dos bandas de emisión se pueden modificar para optimizar la eficiencia luminosa del LED y las características de color de la emisión total. Estos ajustes se pueden lograr modificando el espesor del material epóxido que contiene fósforo que rodea el chip o variando la concentración del fósforo suspendido en el epóxido. La emisión blanca azulada del diodo se sintetiza, en efecto, mediante la mezcla aditiva de colores, y sus características de cromaticidad se representan mediante una ubicación central.

Dos factores, mencionados en el capítulo I, son de importancia primordial para evaluar la luz blanca generada por los LEDS. La eficiencia luminosa y la capacidad de reproducción cromática. Una propiedad denominada índice de reproducción cromática (IRC) se utiliza en fotometría para comparar fuentes de luz y se define como la capacidad de reproducción cromática de la fuente con respecto a la de una fuente de iluminación de referencia estándar.

Se puede demostrar que existe una disyuntiva fundamental entre la eficiencia luminosa y la capacidad de reproducción cromática de los dispositivos emisores de luz. Para una aplicación como la señalización, que utiliza bloques de luz monocromática, la eficiencia luminosa es de importancia primordial, mientras que el índice de reproducción cromática es irrelevante. Para la iluminación general, ambos factores deben optimizarse.

Regresando a como el ojo humano percibe la luz, específicamente la luz blanca. A continuación, documentamos el estándar desarrollado para la clasificación y normatividad de la luz blanca, el sistema CIE.

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

El sistema CIE caracteriza los colores por un parámetro de luminancia Y , y dos coordenadas de color x e y , las cuales especifican un punto sobre el diagrama de cromaticidad. Los parámetros están basados en la distribución de energía espectral (SPD) de la luz emitida por el objeto iluminado, y está contabilizado (factores) por las curvas de sensibilidad, las cuales han sido medidas para el ojo humano. Basada en el hecho de que el ojo humano tiene tres tipos diferentes de conos sensibles al color, la respuesta del ojo se describe mejor en términos de tres "valores triestímulos". La mezcla se puede especificar por tres números X , Y , Z ; se encuentran en diferentes colores, una vez que se logra esto, se encuentra que cualquier color puede ser expresado en términos de dos coordenadas de colores x e y con las combinaciones diferentes de longitudes de ondas que dan el mismo conjunto de valores triestímulos, dará un matiz distinguible para el ojo humano. [iv]

Los colores que se pueden obtener por combinación de un determinado conjunto de tres colores primarios (tales como azul, verde y rojo de una pantalla de televisión a color, RGB en las figuras siguientes) están representados sobre el diagrama de cromaticidad por el triángulo construido uniendo las coordenadas de los tres colores, como se muestra en la Figura 2.8.

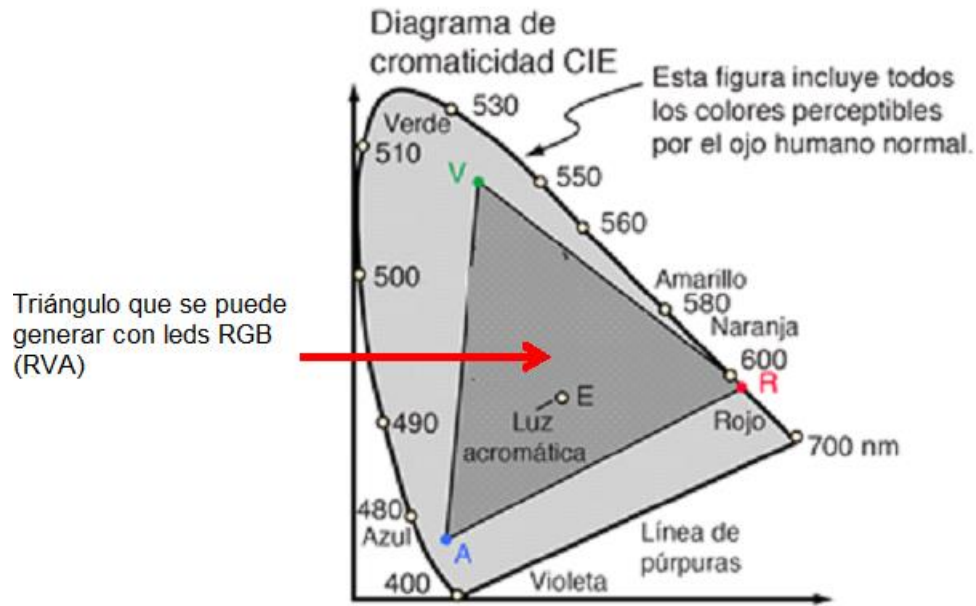


Figura 2.8 Diagrama de cromaticidad CIE, conceptos generales.

La figura 2.8 representa la percepción del color del ojo humano en términos de dos parámetros CIE x e y . Los colores espectrales están distribuidos alrededor del borde del "espacio de color" que se muestra. El mismo incluye todos los tonos percibidos y por ello constituye un marco de trabajo para la investigación del color, como lo muestra la figura 2.9, denominado como diagrama de cromaticidad.

Al diagrama de cromaticidad originalmente desarrollado y asociado con el estándar CIE 1931, se le hicieron revisiones en 1960 y 1976; la versión de 1931 permanece como la más ampliamente usada. La figura 2.10 muestra una representación aproximada de los colores de CIE 1931 sobre el diagrama de cromaticidad. El borde representa la máxima saturación de los colores espectrales, y el diagrama forma el área de todos los tonos perceptibles; la gama de visión del ojo humano cubre el diagrama CIE entero.

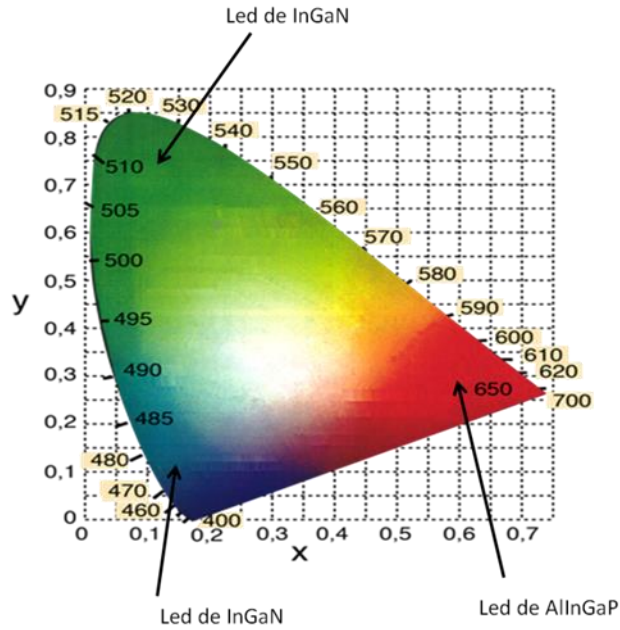


Figura 2.9 Diagrama de cromaticidad CIE con los colores percibidos por el ojo humano.
diagrama de cromaticidad y base del sistema CIE.

La figura 2.10 hace observación del punto básico de la percepción de color acromática (blanco) en el diagrama de cromaticidad CIE (punto E en el diagrama).

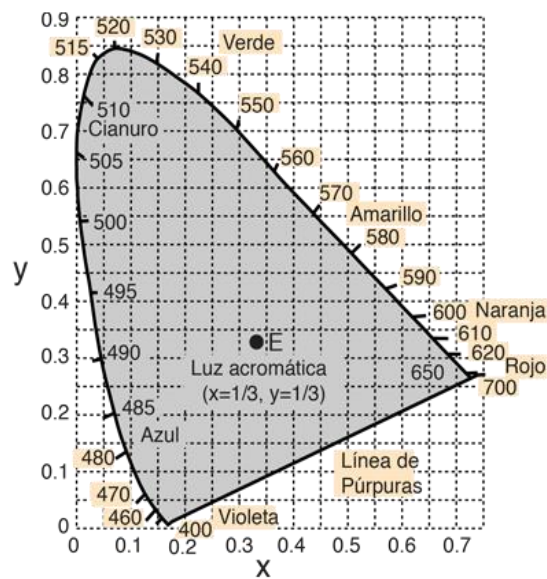


Figura 2.10 Luz acromática $x=1/3$, $y=1/3$

Para proporcionar mejor idea de los colores más comunes, en la figura 2.11 se muestran regiones de color en el diagrama de cromaticidad CIE.

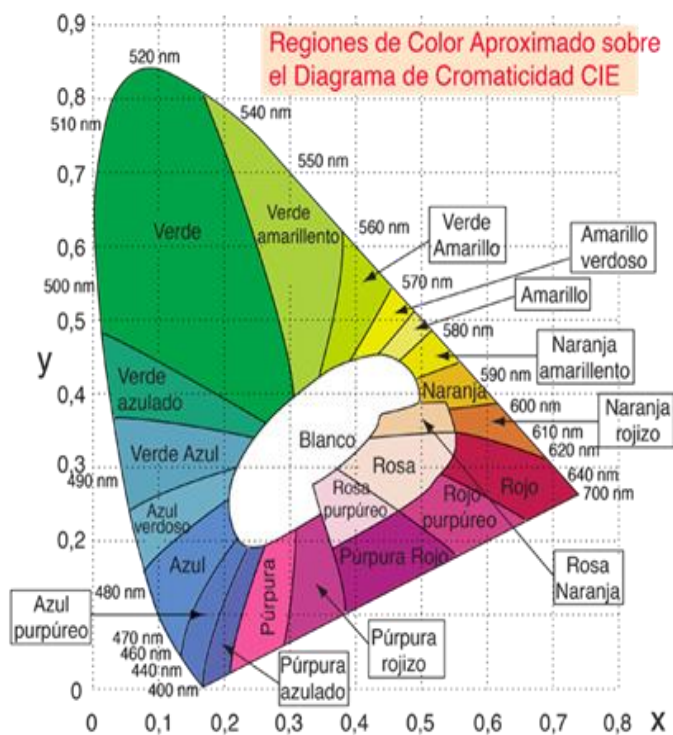


Figura 2.11 Regiones en el diagrama de cromaticidad asociadas a colores comunes

En la figura 2.11 se muestra sobre el diagrama CIE las bases de semiconductores y su región de emisión de color, posteriormente su combinación generará luz blanca. Después la tabla 2.2 muestra, para complementar, sobre la segunda especificación importante de la luz artificial, el índice de reproducción cromática de los leds y su combinación con fósforo.

Tipo de LED	Coordenadas de cromaticidad (x, y)	IRC
LED Dicromático	(0.31, 0.32)	10
LED Dicromático de salida ampliada	(0.31, 0.32)	26
LED Tricromático	(0.31, 0.32)	60
LED basado en fósforo	(0.31, 0.32)	57

Tabla 2.2 Índice de reproducción cromática de las tecnologías para producir luz blanca con LEDS.

La naturaleza espectral de la iluminación emitida por un dispositivo tiene una profunda influencia en su capacidad de reproducción cromática. Aunque la mayor eficiencia luminosa posible se puede obtener mezclando dos colores monocromáticos complementarios, una fuente de luz dicromática de este tipo tiene un índice de reproducción cromática bajo. En un sentido práctico, es lógico que se ilumina un objeto rojo con un diodo que emite luz blanca creada combinando solo luz azul y amarilla, entonces el aspecto del objeto rojo no será muy agradable. Sin embargo, el mismo diodo sería bastante adecuado para iluminar desde atrás un panel transparente o blanco.

Una fuente de luz blanca de amplio espectro que simula el espectro visible del sol posee el índice de reproducción cromática más alto, pero no tiene la eficiencia luminosa de un emisor dicromático.

Los LEDS basados en fósforo, que combinan longitudes de onda de emisión azul con un color de fosforescencia de longitud de onda más larga, o crean luz únicamente a partir de la emisión de fósforo (como en los LEDS con ultravioleta), pueden diseñarse para tener capacidades de reproducción de color bastante altas. **Tienen un carácter de color que es similar en muchos aspectos al de los tubos de lámparas fluorescentes.**

Los LEDS GaInN utilizan la emisión azul del semiconductor para excitar los fósforos, y están disponibles en versiones de blanco frío, blanco cálido y blanco incandescente que incorporan diferentes cantidades de fósforo alrededor del chip. El blanco frío es el más brillante, utiliza la menor cantidad de fósforo y produce luz con el color más azulado. La versión de blanco incandescente rodea el chip que emite azul con la mayor cantidad de fósforo, tiene la salida más tenue y el color más amarillento (más cálido).

El blanco cálido tiene características de brillo y tono de color intermedias entre las otras dos versiones. Las figuras 2.12 y 2.6 representan el sistema completo de un led para iluminación y la estructura de semiconductores respectivamente.

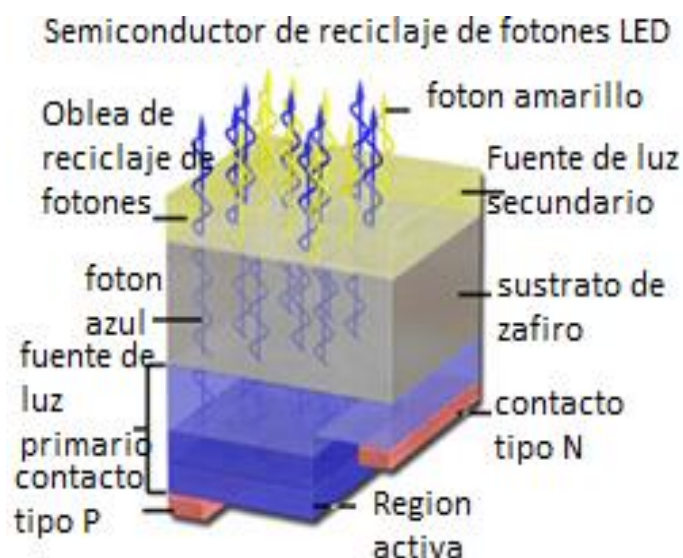


Figura 2.12 La emisión de luz LED y su transformación a otros colores

La esperada disponibilidad de los LEDS blancos ha generado un gran interés en la aplicación de estos dispositivos a las necesidades generales de iluminación. A medida que los diseñadores de iluminación se familiaricen con las características de los nuevos dispositivos, será necesario disipar una serie de conceptos erróneos.

Uno de ellos es que la luz de un LED blanco se puede utilizar para iluminar una lente o un filtro de cualquier color y mantener la precisión y la saturación del color. En varias versiones de los LEDS blancos, no hay ningún componente rojo presente en la salida blanca, o hay

otras discontinuidades en el espectro. Estos LEDS no se pueden utilizar como fuentes generales para retroiluminar paneles de visualización multicolores o lentes de colores, aunque funcionan bien detrás de paneles transparentes o blancos. Si se utiliza un LED blanco GaInN basado en azul detrás de una lente roja, la luz transmitida será de color rosa.

De manera similar, una lente o un filtro naranja aparecerán amarillos cuando se ilumine con el mismo LED. Aunque los beneficios potenciales en la aplicación de los LED son enormes, es necesario considerar sus características únicas al incorporar estos dispositivos en esquemas de iluminación en lugar de fuentes convencionales más familiares.

CAPITULO III DIODOS Y CONTROL DE LEDS. VOLTAJE O CORRIENTE

3.1 Principios de funcionamiento del diodo

Comprender este componente es la base para el entendimiento de los diodos emisores de luz blanca. Por ello iniciamos este capítulo haciendo un resumen del dispositivo. Los diodos, son dispositivos electrónicos fundamentales, desempeñan un papel crucial en el funcionamiento de una amplia variedad de dispositivos y son base para los componentes electrónicos más complejos (transistores), que forman a todos los circuitos integrados.

Forman parte integral de nuestra vida cotidiana. Comprender qué es un diodo y cómo opera es esencial para apreciar la magnitud de su impacto en la electrónica moderna. En términos simples, un diodo es un dispositivo semiconductor que permite el paso de corriente eléctrica en una sola dirección. Su estructura básica consiste en dos capas semiconductoras, una dopada positivamente (llamada ánodo) y otra dopada negativamente (cátodo).

Esta configuración crea una barrera de potencial que solo permite que la corriente fluya del ánodo al cátodo, prohibiendo el flujo en la dirección opuesta. A este proceso se le nombra como la capacidad para rectificar corriente alterna, convirtiéndola en corriente directa.

La aplicación de los diodos básica es el rectificador de onda completo, utilizado en fuentes de alimentación para convertir la corriente alterna suministrada por la red eléctrica en corriente continua. Asimismo, los diodos se encuentran en el corazón de los circuitos de protección, así como en los sistemas de protección contra sobretensiones.

El campo de aplicación de los diodos se extiende mucho más allá de la rectificación. Son elementos esenciales en la construcción de circuitos electrónicos, desde simples radios hasta complejos dispositivos digitales. Además, los diodos LED (diodos emisores de luz) han revolucionado la iluminación, proporcionando una alternativa eficiente y duradera a las fuentes de luz convencionales; para el presente proyecto se explota esta función del LED, que se polariza en DC y controlando su corriente o voltaje se posiciona como emisor de luz en puntos específicos de su curva de operación, de la cual documentamos en adelante.

3.2 Tipos de diodos

Diodo de unión PN: es el diodo estándar y más común. Se le denomina como diodo rectificador. Se forma al unir una capa semiconductor dopada positivamente (P) con otra

dopada negativamente (N). Su característica principal es permitir el flujo de corriente en una sola dirección, bloqueando en la dirección opuesta.

Diodo Schottky: gracias a su unión metal-semiconductor, presenta una caída de voltaje menor que los diodos de unión PN. Esto lo hace ideal para aplicaciones que requieren conmutación rápida y baja pérdida de energía.

Diodos Zener: se utilizan para mantener un voltaje constante en un circuito, actuando como reguladores de voltaje. Su operación es en la región inversa controlando la corriente inversa para no dañarlo. Cuando se alcanza un determinado voltaje inverso, el diodo Zener conduce, permaneciendo un voltaje Cátodo-Ánodo casi constante.

Diodos emisores de luz (LED): convierten la corriente eléctrica en luz visible. Los semiconductores utilizados para su funcionamiento además de permitir el flujo de electrones provocan el “desprendimiento” de fotones y por tanto luz visible o dentro del espectro cercano a la misma. Su eficiencia energética y durabilidad los hacen fundamentales en iluminación y visualización en dispositivos electrónicos.

Fotodetector de diodos: estos diodos generan corriente cuando los semiconductores que lo forman se exponen a la luz, convirtiendo la energía luminosa en eléctrica. Se emplean en aplicaciones como fotodetectores y celdas solares. Como venimos diciendo, los diodos desempeñan roles cruciales en una amplia gama de aplicaciones electrónicas, contribuyendo al funcionamiento eficiente y seguro de numerosos dispositivos.

3.3 Algunas funciones de los diodos

Rectificación de corriente: La función es “rectificador de corriente alterna”, convirtiéndola en corriente continua. Esto es esencial en fuentes de alimentación y dispositivos electrónicos que requieren una fuente de energía constante.

Protección contra sobretensiones: Los diodos se utilizan en circuitos de protección para evitar daños causados por sobretensiones. Actúan como interruptores automáticos que dirigen la corriente excesiva lejos de los componentes sensibles.

Regulación de voltaje: Los diodos Zener son fundamentales en la regulación de voltaje, garantizando que un circuito reciba una tensión constante, independientemente de las variaciones en la fuente de alimentación.

Comunicación y detección de luz: Los diodos fotodetectores y LED son esenciales en la comunicación óptica y la detección de luz en dispositivos como sensores de proximidad, controles remotos y sistemas de fibra óptica.

La diversidad de tipos de diodos y sus funciones hacen que sean componentes indispensables en la electrónica. Su comprensión y aplicación adecuada permiten el diseño y desarrollo eficiente de circuitos electrónicos en una amplia variedad de aplicaciones y tecnologías. La Figura 3.1 Símbolo esquemático de un diodo rectificador



Figura 3.1 Esquemático del diodo

3.4 Regiones o curvas de funcionamiento del diodo

Para entender la curva de operación del LED, haremos un análisis de funcionamiento superponiendo una señal de DC y una de AC. En el circuito de la figura 3.2, se supone que la fuente de tensión v_i es una señal senoidal y variable en el tiempo. La tensión total de entrada V_i se compone de una componente DC V_{ps} y una componente AC V_i superpuesta al valor dc. Aplicando el principio de superposición vamos a ver dos tipos de análisis: un análisis de DC que incluye sólo las tensiones y corrientes de DC, y un análisis de AC que incluye sólo las tensiones y corrientes alternas. De acuerdo a la figura 3.2, tenemos qué:

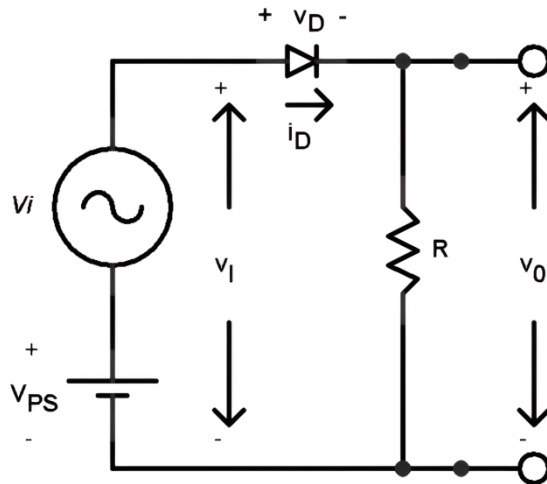
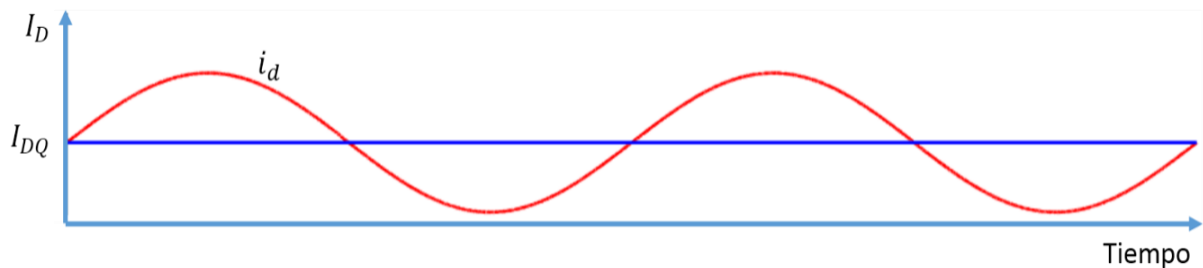
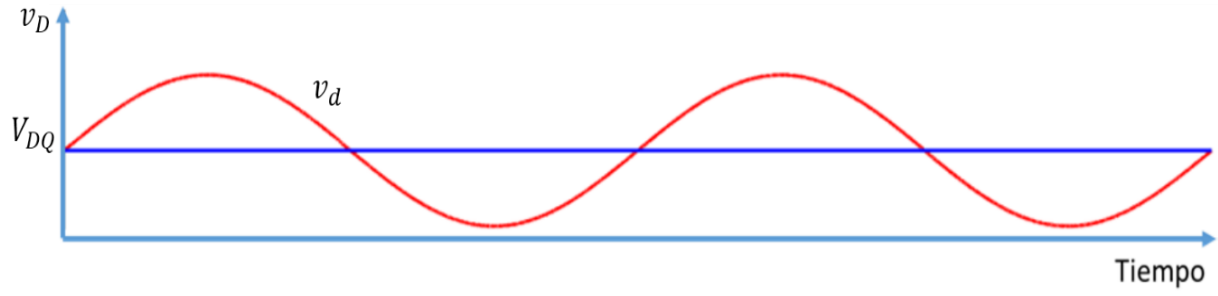


Figura 3.2 circuito de aplicación de un diodo rectificador

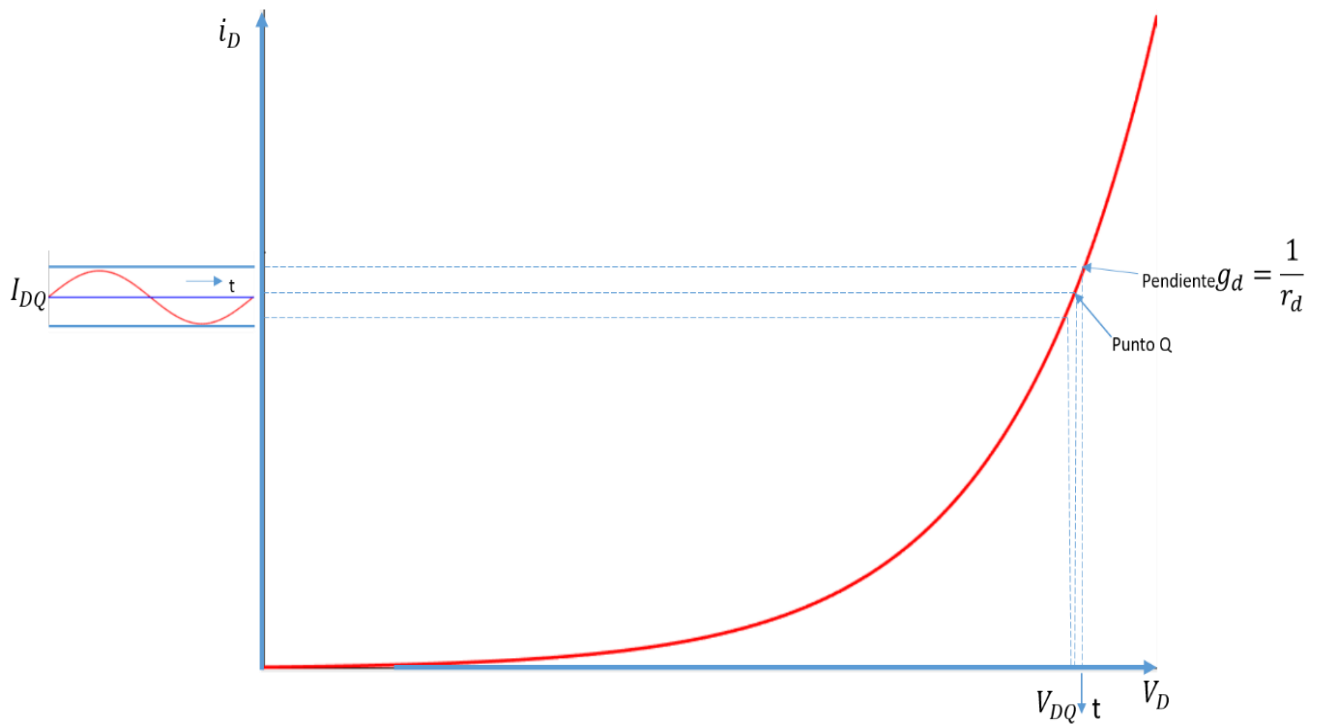
Dado que la tensión de entrada contiene una componente de DC con una señal de AC superpuesta, la corriente de diodo también contendrá una componente de DC. con una señal de AC superpuesta, como se muestra en la Figura 3.3a. Aquí, I_{DQ} es la corriente de DC en el diodo más una corriente de AC i_D superpuesta. Para este análisis, se supone que la señal de AC es pequeña comparada con la componente de DC, de modo que pueda desarrollarse un modelo de AC lineal a partir del diodo no lineal (veremos que la curva de funcionamiento del diodo no es lineal). Las respectivas señales del voltaje en el diodo se muestran en la figura 3.3b



a



b



c

Figura 3.3 Señales de Voltaje, corriente de la figura 3.2 y la curva de operación del diodo

Las gráficas de la figura 3.3 se realizaron en Matlab de acuerdo a los programas:

```
%GRAFICAR OPERACION DC + AC DEL DIODO
```

```
t=[0:0.001:4*pi];
```

```
DC=1;
```

```
y=DC+0.1*sin(t);
```

```
y1=DC+0.1*sin(t)-0.1*sin(t);
```

```
plot(t,y,'r','LineWidth',2)
```

```
ylim([0.25 1.25])
```

```
hold on
```

```
plot(t,y1,'b','LineWidth',2)
```

```
%GRAFICAR CURVA DEL DIODO
VD=[0:0.001:1];
VT=0.025;
IS=0.0001;
ID=IS*exp(VD/VT);
plot(VD,ID,'r','LineWidth',2)
xlim([0.85 1.05])
```

La figura 3.3c muestra la curva del diodo y su posición de I_{DQ} debida a la corriente de DC y superpuesta la señal de AC. Esta figura muestra las características I-V del diodo polarizado hacia delante (en directa) con una corriente y tensión senoidal superpuesta.

La relación entre la corriente y el voltaje del diodo se modela en la curva mostrada, siendo exponencial, de acuerdo a la ecuación

$$i_D \cong I_S e^{\left(\frac{V_D}{V_T}\right)} = I_S e^{\left(\frac{V_{DQ} + V_d}{V_T}\right)} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde V_{DQ} es el voltaje de DC y V_d es la componente en AC.

I_S es corriente de saturación

V_T es voltaje térmico, aproximadamente 25mV

Arreglando la ecuación 3.1:

$$i_D = I_S \left[e^{\left(\frac{V_{DQ}}{V_T}\right)} \right] * \left[e^{\left(\frac{V_d}{V_T}\right)} \right]$$

Trasladando este modelo a solo DC con $V_D=0$, para el caso de diodos LED de iluminación la ecuación queda solamente:

$$i_D = I_S \left[e^{\left(\frac{V_{DQ}}{V_T}\right)} \right]$$

Conclusión: Para el caso de LEDS en iluminación, el modelo se simplifica, aunque sigue siendo no lineal.

Los LEDS de luz blanca han sido mejorados para una mejor aproximación lineal. A continuación, mostramos dos ejemplos de led de la marca CREE y BRIDGELUX para visualizar su curva de funcionamiento y aproximación lineal.

3.5 Regiones de operación de los diodos LED de luz blanca y su control por corriente

3.5.1 LED CREE serie 3030

Marca: CREE [13], Modelo: J SERIES® 3030 HIGH-EFFICACY LED

Curva de funcionamiento de flujo luminoso en Matlab, graficada con la hoja de datos del fabricante.

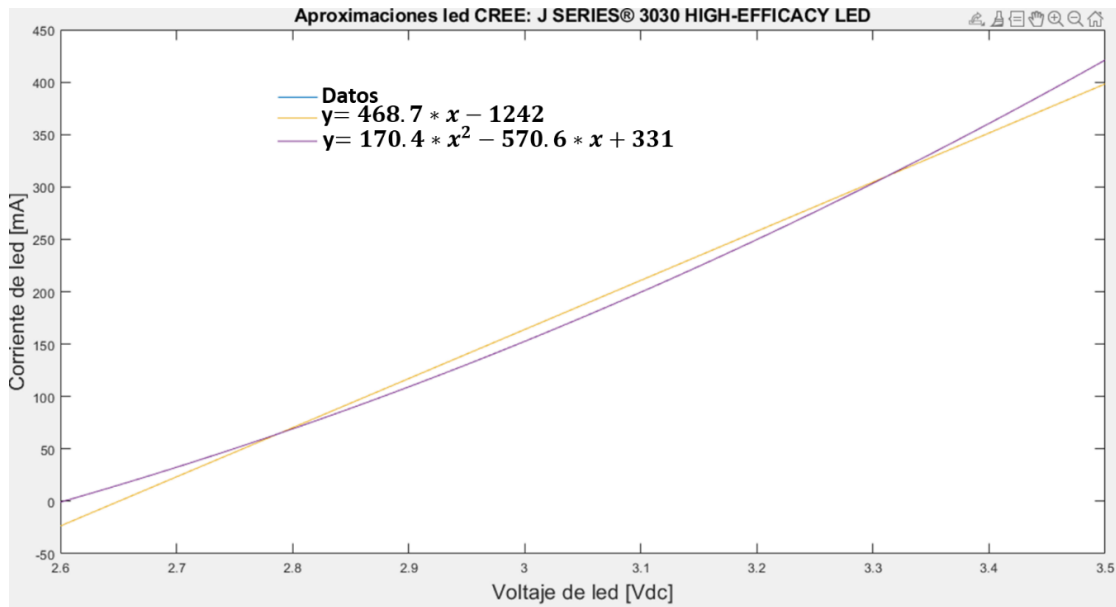


Figura 3.4 Modelado del diodo LED CREE serie 3030

Curva de operación del diodo:

Modelo lineal

$$y = 468.7 * x - 1242$$

Modelo Cuadrático:

$$y = 170.4 * x^2 - 570.6 * x + 331$$

[13] CREE LED Marca Registrada, 2025 Cree LED, a Penguin Solutions brand. All rights reserved.

Se puede observar que el diseño de los leds para iluminación, en lo que respecta a su curva de operación es un modelo muy lineal en comparación a los diodos para uso general.

```
% Interpolación operación led CREE
% Calcular el polinomio de interpolación de grado 1 y 2
% Datos obtenidos de las graficas del proveedor
x = [2.72, 2.78, 2.825, 2.88, 2.925, 2.965, 3.02, 3.063, 3.1, 3.14 ]
y = [40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220]
c = polyfit(x,y,2)
% Graficar la solución
z = linspace(2.6,3.5);
%Crear el polinomio
p = polyval(c,z);
plot(z,p)
hold on
%plot([-1,7],[0,0], 'k','LineWidth',1.1)%Eje de las x
%plot([0,0],[-10,6], 'k','LineWidth',1.1)%Eje de las y
%plot(x,y,'r.','MarkerSize',15)%Puntos por donde pasa el polinomio
%axis([-2,8,-11,7])%Ejes de la gráfica
title('Aproximaciones led CREE: J SERIES® 3030 HIGH-EFFICACY
LED','FontSize',14)
xlabel('Voltaje de led [Vdc]','FontSize',16)
ylabel('Corriente de led [mA]','FontSize',16)
legend('Datos','Ajuste lineal','Ajuste por parábola')
hold off
```

3.5.2 LED Bridgelux COB

Marca: Bridgelux^[14], Modelo: Gen 7 Vero 18 Array

Curva de funcionamiento de flujo luminoso y sus aproximaciones en Matlab:

^[14] Bridgelux LED Marca Registrada

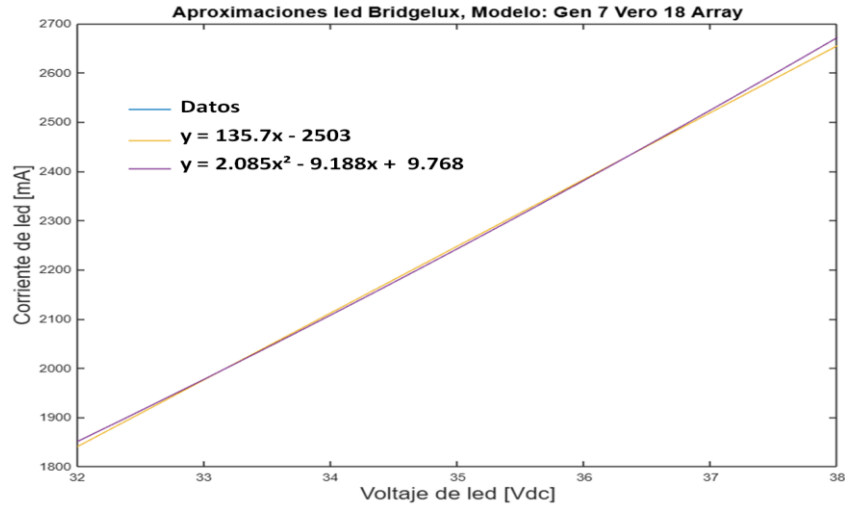


Figura 3.5 Modelado del diodo LED Bridgelux COB

Curvas de operación del diodo: Modelo lineal: $y = 135.7x - 2503$.

Modelo Cuadrático:

$$y = 2.085x^2 - 9.188x + 9.768.$$

Se puede observar que el diseño de los leds para iluminación, en lo que respecta a su curva de operación es un modelo muy lineal en comparación a los diodos para uso general.

```
% Interpolación operación led Bridgelux
% Calcular el polinomio de interpolación de grado 1 y 2
% Datos obtenidos de las graficas del proveedor
X=[32.5, 33, 33.5, 34, 34.5, 35, 35.5, 36, 36.5, 37]
y=[0.220, 0.290, 0.500, 0.600, 0.700, 0.850, 1.000, 1.290, 1.300, 1.450]
c = polyfit(x,y,2)
% Graficar la solución
z = linspace(32,37.5);
%Crear el polinomio
p = polyval(c,z);
plot(z,p)
hold on
%plot([-1,7],[0,0], 'k','LineWidth',1.1)%Eje de las x
%plot([0,0],[-10,6],'k','LineWidth',1.1)%Eje de las y
%plot(x,y,'r.','MarkerSize',15)%Puntos por donde pasa el polinomio
%axis([-2,8,-11,7])%Ejes de la gráfica
title('Aproximaciones led Bridgelux, Modelo: Gen 7 Vero 18 Array','FontSize',14)
xlabel('Voltaje de led [Vdc]','FontSize',16)
ylabel('Corriente de led [mA]','FontSize',16)
legend('Datos','Ajuste lineal','Ajuste por parábola')
hold off
```

CAPITULO IV CONTROLADORES INTELIGENTES PARA ILUMINACIÓN CON LEDS (DRIVERS)

4.1 Antecedentes. Fuentes conmutadas, tipos

En electrónica actualmente la aplicación de convertidores DC/DC es muy amplia, los convertidores tipo Buck son muy comunes, así como otras dificultades. En el presente capítulo documentaremos un resumen sencillo de fuentes conmutadas como base para fundamentar la aplicación de una variante del “Buck converter” en la propuesta de los objetivos del proyecto.

Para el funcionamiento correcto de una fuente luminosa con LED se requiere de manera básica de una fuente de voltaje o corriente controlada. Las fuentes de potencia eléctrica iniciaron con circuitos lineales para su control, teniendo baja eficiencia, necesidad de disipación de calor, tamaño considerable, entre otras. Para superar estas limitaciones se ha recurrido al diseño de fuentes conmutadas “switching”, debido a sus características de eficiencia y bajo volumen. Sin embargo, inconvenientes como la emisión de ruido electromagnético, de radio frecuencia y factor de potencia bajo, que son inherentes a su constitución, deben ser considerados para cumplir normatividad.

El término conmutación, corresponde a la acción repetida de circular una corriente e interrumpirla, a través de un circuito. El principio general de una fuente conmutada, tiene como objetivo la conversión de una tensión DC o AC en otra DC como resultado de la conmutación de corriente a través de una inductancia. La energía resultante será rectificadora y filtrada para disponer del voltaje DC a la salida del convertidor.

La salida depende del control efectuado por un circuito, el cual, gracias a la comparación entre muestra y referencia, administra el tiempo de encendido/apagado (conmutación) del interruptor en serie con la bobina, para suministrar de manera controlada la corriente a través de la misma. El elemento conmutador o interruptor generalmente es un transistor Mosfet [15] actualmente.

Los principios y bases matemáticas son elementos de funcionamiento y control para las fuentes conmutadas de aplicación universal. Sin embargo, en aplicaciones reales se requiere además implementar protecciones, filtros y otros elementos para cumplir los objetivos

[15] MOSFET, acrónimo de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor,

completos; por ejemplo, protección a corto-circuito, transitorios de la entrada, filtrado de ruido, corrección del factor de potencia si la entrada es AC, etc.

Las reacciones generadas en una bobina y la energía almacenada en la misma ante cambios súbitos de corriente, pueden ser convertidas en tensiones de corriente continua a través de rectificación y filtraje. Si el elemento de conmutación disipa una baja proporción de la energía en forma de calor, la eficiencia del circuito será muy superior a la de una fuente lineal.

El voltaje de salida de la fuente o convertidor DC/DC está en relación con el tiempo de encendido y apagado del dispositivo conmutador, por tanto, el sistema de regulación debe controlar estos tiempos para que la fuente tenga una salida constante en condiciones diferentes de entrada y carga.

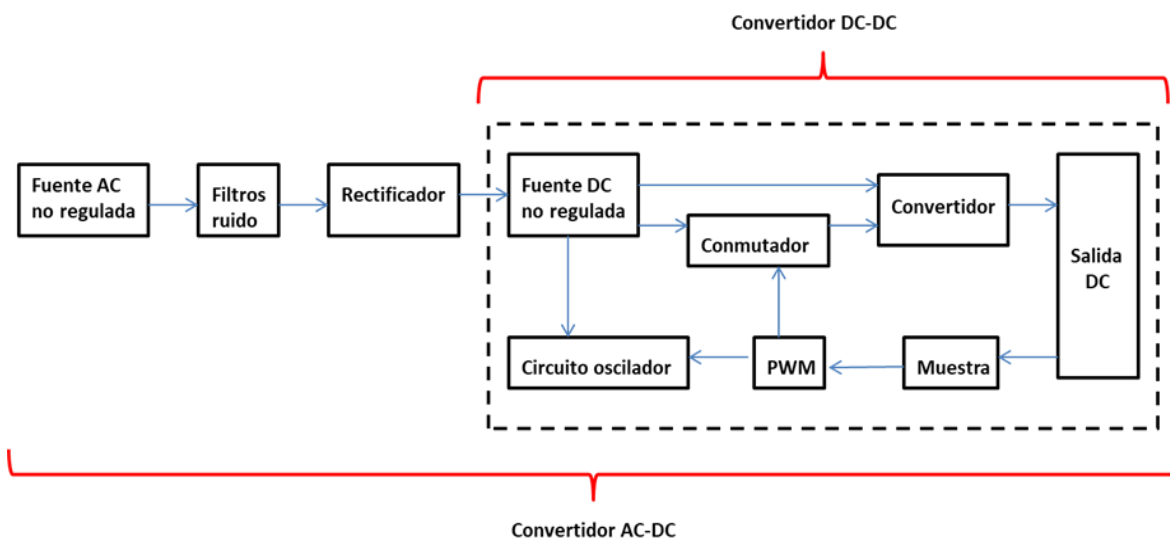


Figura 4.1 Diagrama de bloques de una fuente conmutada.

Para el caso de los circuitos conmutados que se utilizan como reguladores directos DC/DC para convertir una tensión continua sin regular en una tensión continua regulada, para comprender utilizaremos las figuras 4.2 y 4.3.

La figura 4.2 muestra el circuito de realimentación, compara la tensión de salida, una muestra de ella, para generar los tiempos de apagado/encendido del conmutador del convertidor.

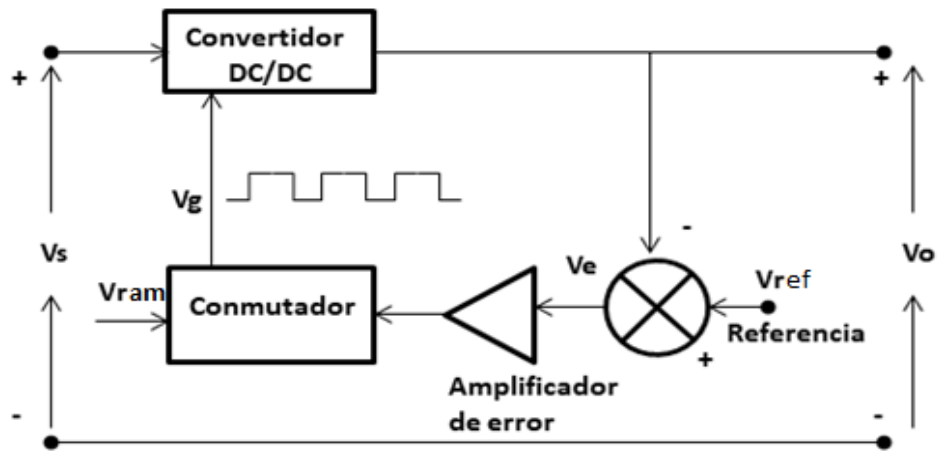


Figura 4.2 Diagrama a bloques del circuito de control de una fuente conmutada

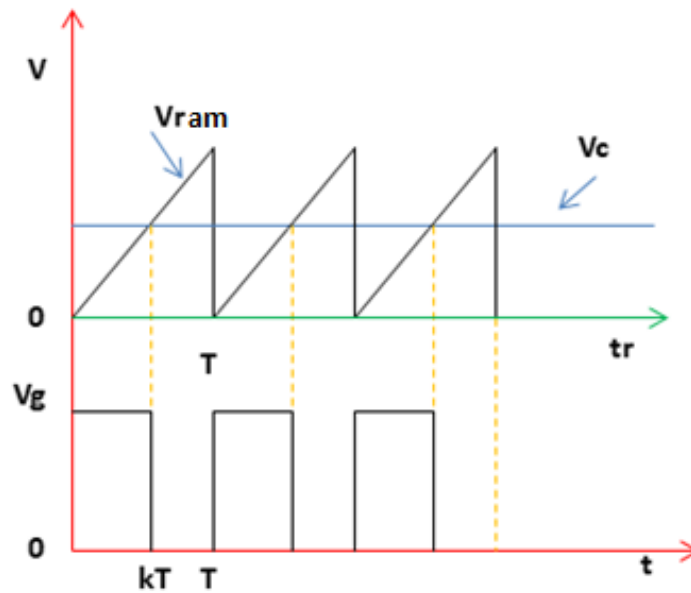


Figura 4.3 Diagrama de señales de control en una fuente conmutada

4.1.1 Principio de operación del circuito conmutado, comentarios y recomendaciones

De acuerdo a la figura 4.2, la tensión de “error” (V_e) se obtiene comparando la tensión de salida V_o con una de referencia V_{ref} .

V_e es comparada con una forma de onda “diente de sierra” (V_{ram}), figura 4.3, para generar la señal de control del tipo PWM (V_g).

Los interruptores (conmutador) están constituidos por semiconductores de potencia **BJT**¹⁶, **MOSFET**, **IGBT**¹⁷, que poseen un **ton** (tiempo de encendido) y un **toff** (tiempo de apagado) mínimo, para minimizar las pérdidas por apagado/encendido del dispositivo, denominadas pérdidas por conmutación.

El ciclo efectivo de trabajo “k” de la señal **Vg** (PWM) [¹⁸] sólo puede estar entre $0 < k < 1$.

Los valores mínimo y máximo de la tensión de salida **Vo** están limitados, por la frecuencia fija del oscilador y los valores del inductor.

El método de control típico es el de Modulación de Ancho de Pulsos a frecuencia fija (PWM).

La frecuencia de trabajo debe ser lo más elevada posible para qué, el voltaje de rizo de **Vo** se reduzca y minimizar el tamaño de los inductores del circuito.

Las pérdidas del dispositivo conmutador aumentan con la frecuencia de trabajo, así como las pérdidas en el núcleo magnético de inductores.

Para aumentar la eficiencia del convertidor, el periodo de oscilación que da la frecuencia de funcionamiento debe ser mayor, como regla general, al tiempo de conmutación máximo del dispositivo utilizado especificado por el fabricante.

Debido a la conmutación de la onda de tensión, tiene alto contenido de armónicos, haciendo necesario un filtro L-C a la salida.

Los reguladores comerciales son circuitos integrados donde la frecuencia de trabajo se suele fijar con una red R-C externa o se fija internamente.

4.1.2 Tipos de fuentes conmutadas básicas

Existen varias topologías de convertidores DC/DC, denominadas celdas de conversión. [iii]
Entre las cuales, tres básicas son:

[¹⁶] BJT acrónimo de Bipolar Junction Transistor

[¹⁷] IGBT acrónimo de Insulated Gate Bipolar

[¹⁸] PWM. Pulse Width Modulation. Modulación por Ancho de Pulso

Regulador Reductor BUCK.

Regulador Elevador BOOST.

Regulador Reductor y Elevador BUCK-BOOST.

Estos convertidores se controlan de acuerdo a los tiempos de conmutación y, por tanto: Sus efectos en la corriente de la bobina del circuito. Los principales métodos de control son: Modo de conducción continua (CCM), modo de control de conducción discontinua (DCM) y modo de control en la frontera continua-discontinua (BCM) (para su conocimiento consultar la bibliografía). [iv]

En los siguientes apartados hacemos un resumen de los tipos de convertidores, para posteriormente hablar sobre los tipos usados para el control de fuentes luminosas con LEDS blancos. **Nota:** Aunque en las aplicaciones para iluminación con LEDS blancos también es común el convertidor Flyback, en el presente documento no lo contemplamos.

4.1.3 Convertidor reductor Buck

El convertidor reductor o convertidor Buck (o step-down), convierte la tensión DC de entrada a una tensión de salida DC de menor nivel. Es una fuente conmutada con dos dispositivos semiconductores (transistor y diodo), un inductor y opcionalmente un condensador a la salida.

El funcionamiento del convertidor reductor es sencillo, consiste en controlar la corriente de un inductor por un diodo y un transistor, como un MOSFET, pero puede ser cualquier elemento que pueda conducir y aislar de manera controlada, tanto el diodo como el elemento conmutador alternan la conexión del inductor bien a la fuente de alimentación o a la carga mediante un circuito oscilador PWM.

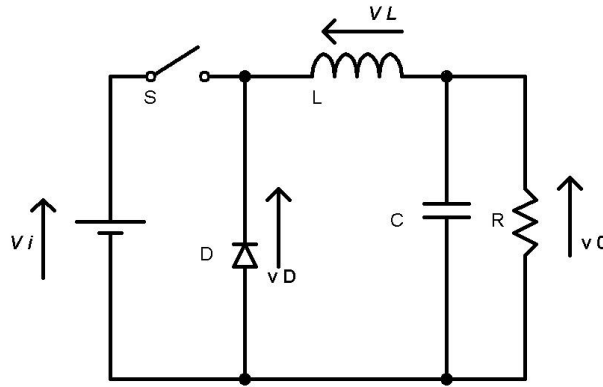


Figura 4.4 Esquemático general de un convertidor Buck

Para entender su funcionamiento hay que hacer un análisis en dos estados, cuando el transistor (S) conduce (Estado “ON”) y cuando no lo hace (Estado “OFF”) y, por tanto, aísla a la fuente.

Estado “ON”: Cuando el transistor conduce, la corriente va desde la fuente de entrada hasta el condensador, cargando a su paso la bobina. Por el diodo por tanto no pasa corriente, no conduce, ya que está polarizado inversamente. La ecuación, siguiendo las leyes de Kirchhoff, queda:

$$V_i = V_{son} + V_{Lon} + V_o \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Despejando V_o :

$$V_o = V_i - V_{son} - V_{Lon} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

V_i Es el voltaje de entrada

V_{son} , es el voltaje de encendido del dispositivo conmutador (comúnmente MOSFET), en el caso lo consideraremos $V_{son} = 0V$.

V_{Lon} , voltaje en el inductor durante el tiempo de encendido del conmutador (t_{on})

V_o , es el voltaje de salida del convertidor, se observa que V_o será menor a V_i , de ahí el nombre de convertidor reductor

La función de este estado es almacenar energía en la bobina, el principal elemento de almacenamiento de energía, además de alimentar la carga con el voltaje suficiente gracias al condensador.

Estado “OFF”: Cuando el transistor se pone en un estado de corte, es decir, no hay conducción porque está abierto (toff), la fuente principal de energía no alimenta el circuito. En ese momento, la energía del inductor almacenada en el de campo magnético, para hacer circular una corriente por el circuito. Esta corriente sigue alimentando al condensador y mantiene el nivel de voltaje a la salida, el diodo se polariza en directa para cerrar el circuito durante este tiempo toff. La ecuación para este “estado OFF” queda:

$$-V_d = -V_{Loff} + V_o \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Despejando V_o :

$$V_o = V_{Loff} - V_d \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde:

V_d , Voltaje del diodo en conducción

V_{Loff} , Voltaje en el inductor durante el tiempo de apagado del conmutador (toff)

V_o , Voltaje de Salida del convertidor, el V_o se mantiene regulado por la energía suministrada por el inductor.

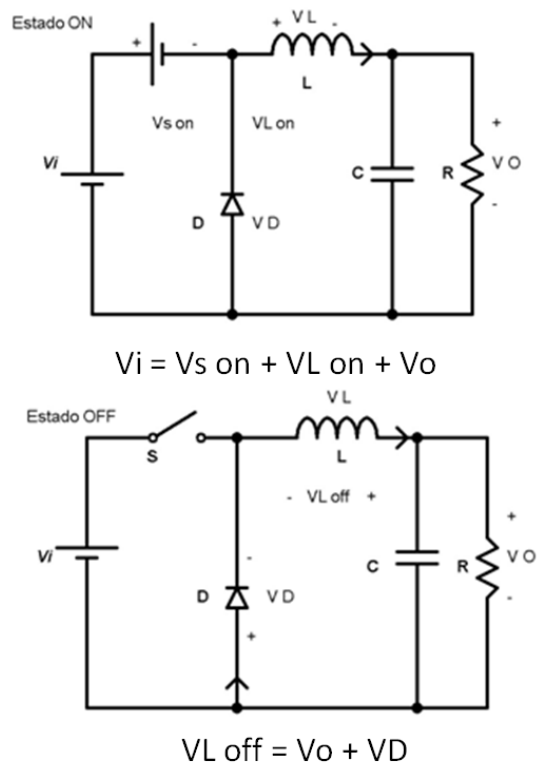


Figura 4.5 Estados básicos de operación de un convertidor Buck

Por lo tanto, entre estos dos estados de conducción y no conducción es como se transforma el voltaje de entrada al de salida. Al conmutar entre estados, a una frecuencia fija, la conversión dependerá de cuánto dura cada estado con respecto a la frecuencia. Por convención se usa el estado de conducción del ciclo de trabajo del PWM como base.

Para dos situaciones de funcionamiento: **Modo Continuo** (si la corriente que pasa a través del inductor (I_L) nunca baja a cero durante el ciclo de conmutación) y **Modo Discontinuo** (la carga consume menos de lo que el circuito puede entregar en un ciclo) existen los análisis matemáticos que dan cualidades de funcionamiento como: regulación, ruido, entre otras; como mencionamos anteriormente si se requiere de profundizar en estos modos de funcionamiento consultar la bibliografía específica.

Debido a las características mostradas, para diseñar e implementar el convertidor Buck necesitaremos responder algunas preguntas: ¿Qué voltajes de entrada tenemos?, ¿Qué voltaje

de salida necesitamos? ¿Cuál es la corriente máxima que queremos suministrar? ¿Con qué frecuencia de conmutación (PWM)? ¿Qué regulación del voltaje de salida requerimos?

4.1.4 Convertidor elevador Boost

El convertidor elevador o convertidor boost (o step-up) es un convertidor DC/DC que obtiene a su salida una tensión continua mayor que la de su entrada. Es un tipo de fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos interruptores semiconductores (diodo y transistor), y al menos un elemento para almacenar energía (condensador, bobina o combinación de ambos). Frecuentemente se añaden filtros contruidos con inductores y condensadores para mejorar el funcionamiento.

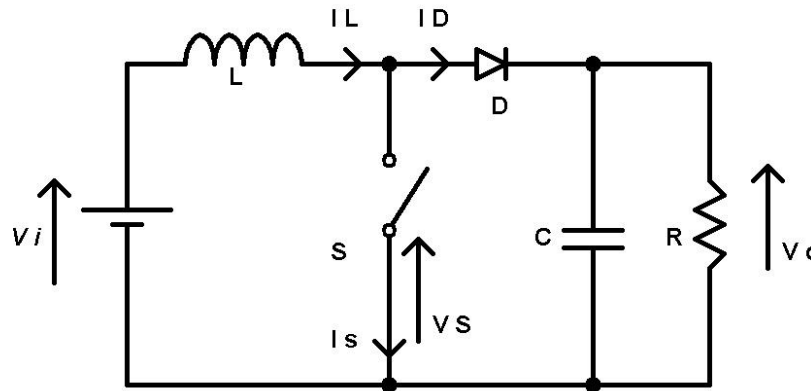


Figure 4.6 Esquemático general de un convertidor boost

El funcionamiento es parecido al del convertidor Buck, ya que tiene básicamente los mismos elementos, pero en otra posición. El transistor (S) se comporta como un interruptor que cambiará entre los dos estados posibles, “ON” y “OFF”.

Estado “OFF”: Cuando el transistor se pone en un estado de corte, es decir, no hay conducción porque está abierto, la corriente pasa por la bobina (L), luego por el diodo (que está en polarización directa y obliga a que vaya en ese sentido la corriente) y finalmente se reparte entre el condensador y la carga. Entonces está alimentando a la carga y a la vez está

cargando al condensador. Esta corriente alimentando al condensador y mantiene el nivel de voltaje a la salida. La ecuación para este “estado OFF” queda:

$$V_i - V_o - V_D = -L(dI/dt) \text{ Ecuación 4.5}$$

Despejando V_o :

$$V_o = V_i - V_D + L(dI/dt) \text{ Ecuación 4.6}$$

Donde:

V_i , Voltaje de Entrada

V_o , Voltaje de Salida, de la ecuación 4.6 se observa que V_o será mayor al V_i , denominado convertidor elevador

V_D , el voltaje del diodo en polarización directa, se considera comúnmente $V_D = 0$ para simplificar el análisis.

$V_L = L(dI/dt)$ voltaje en el inductor

Cuando el condensador está totalmente cargado, de acuerdo al voltaje V_o como objetivo de control, que lo determina el **ton** del PWM se cierra el interruptor, pasa al estado “ON”.

Estado “ON”: Cuando el transistor conduce, la corriente va desde la fuente de entrada a la bobina, y después toda la corriente de la entrada se va por el transistor, ya que actúa como camino cerrado y supone un camino más fácil (menos resistencia) para ella. Por tanto, la otra parte del circuito queda independiente, el diodo hace que la corriente no pueda ir en sentido contrario, queda en polarización inversa. Es entonces cuando el condensador que está totalmente cargado al **Vomax** alimenta a la carga. Una vez se alcance V_{omin} determinado por el **ton** del PWM, se vuelve a cambiar el estado del transistor, volviendo al estado “OFF”.

Durante el estado “ON”, el conmutador S está cerrado, lo que hace que el voltaje de entrada (V_i) aparezca entre los extremos del inductor, lo que causa un cambio de corriente (I_L) a través de este durante un período (t), según la fórmula:

$$V_i = L(dI/dt) \text{ Ecuación 4.7}$$

Donde:

(dI/dt) , cambio de corriente en el inductor L , la velocidad de la misma en el tiempo

V_i , es el voltaje de entrada al convertidor

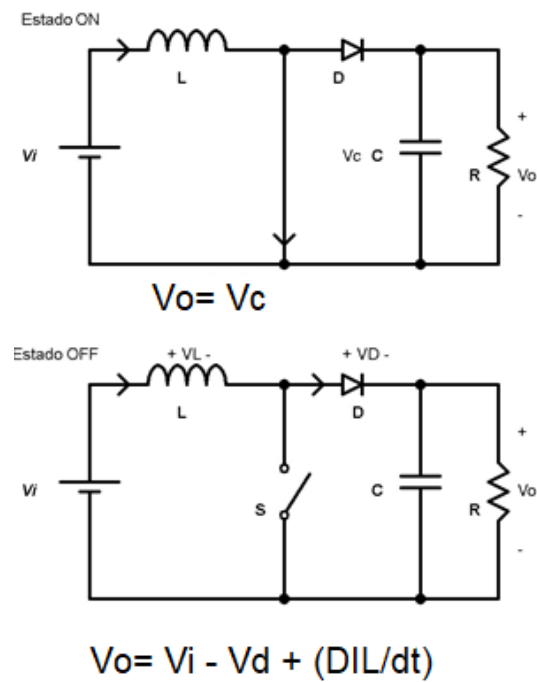


Figure 4.7 Estados “ON” “OFF” del convertidor Boost

Existen también dos “modos” de funcionamiento básicas: Modo continuo (toda la energía se transfiere a la carga, sin llegar a que la corriente se anule), y Modo Discontinuo (la carga consume menos de lo que el circuito puede entregar en un ciclo).

4.1.5 Convertidor reductor-elevador

Por último: El convertidor reductor-elevador o convertidor Buck-Boost qué como su nombre indica, reduce o aumenta la tensión en su salida.

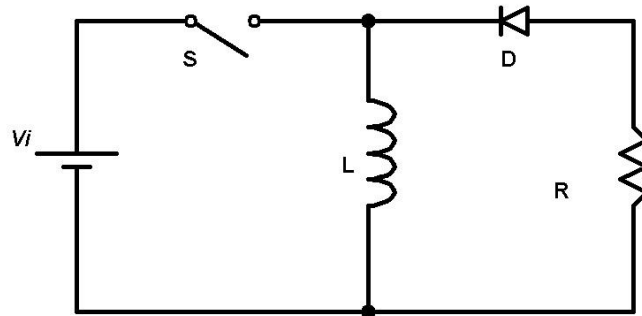


Figure 4.8 Esquemático general del convertidor Buck-Boost

Hay dos topologías distintas para estos convertidores:

Convertidores de forma inversora, donde el voltaje de salida es de polaridad inversa al de la entrada y convertidor reductor seguido de un elevador, el voltaje de salida tiene la misma polaridad que la entrada, y puede ser mayor o menor que el de entrada. Un convertidor reductor-elevador no inversor puede utilizar un único inductor que es usado para el reductor y el elevador.

Para reducir o elevar el voltaje de salida, se controla la variable **ton** de ciclo de trabajo del transistor de conmutación.

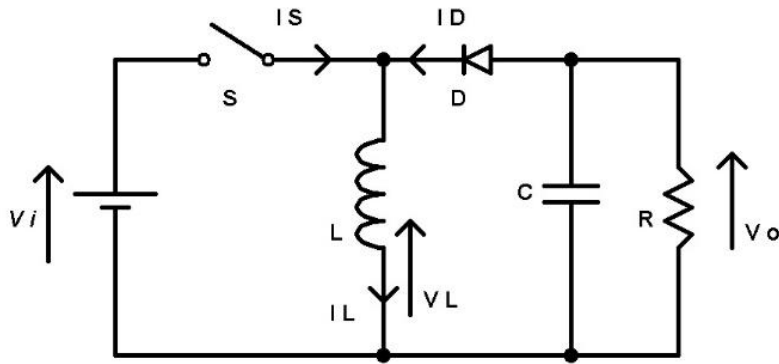


Figure 4.9 Convertidor Buck Boost no inversor de polaridad

Para el caso mostrado en la figura 4.9 también como hay dos estados básicos de funcionamiento, dependiendo de los tiempos **ton** y **toff** del transistor (S):

Estado “ON”: La fuente de entrada de voltaje está directamente conectada al inductor (L). Por lo que se almacena la energía en L, la cual se va cargando. En este estado, el condensador proporciona corriente a la carga de salida R.

Estado “OFF”: Ya no hay fuente de energía a la entrada. Ahora el inductor está conectado a la carga de salida y el condensador, por lo que la energía es transferida de la bobina L a C y a la carga R, se puede observar que, dependiendo de la energía almacenada en el inductor, el voltaje de salida podrá ser inferior o superior al V_i .

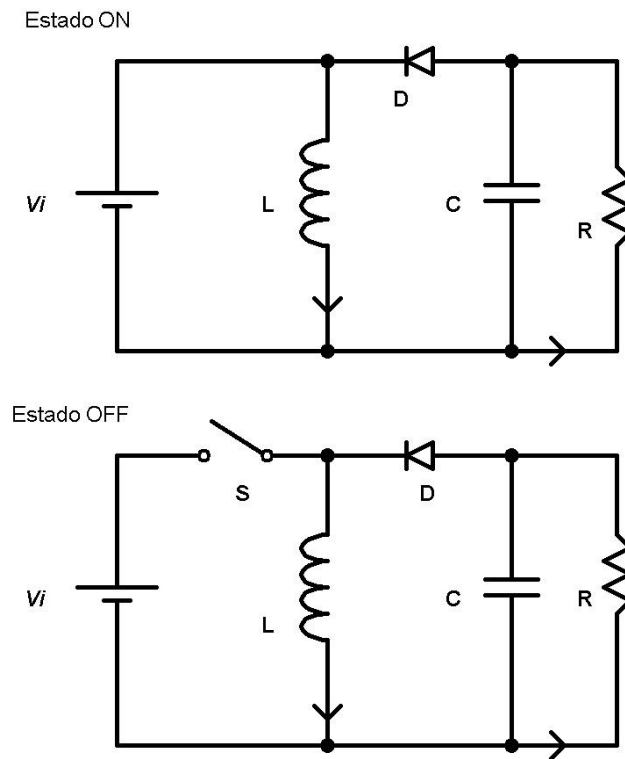


Figure 4.10 Estados “ON” “OFF” del convertidor Buck Boost

Para este convertidor existen las ecuaciones de funcionamiento, en el presente no las mencionaremos.

4.2 Ventajas y desventajas de las fuentes conmutadas

Las fuentes de alimentaciones conmutadas, también conocidas como SMPS (Switched Mode Power Supplies), utilizan dispositivos electrónicos en conmutación para convertir la corriente alterna en corriente continua. A continuación, examinaremos las ventajas y desventajas de estas fuentes de alimentación.

Ventajas:

Eficiencia: Las fuentes de alimentación conmutadas son mucho más eficientes que las lineales, presentan pérdidas en estado de encendido (ON) y en las transiciones entre ON y OFF, no así las fuentes lineales que presentan pérdidas altas al funcionar en la región activa permanentemente.

Tamaño: Las fuentes conmutadas son más ligeras y compactas que las lineales, porque su principio de operación por frecuencia alta, disminuye el tamaño de componentes inductivos y capacitivos; además de que su disipación de calor requiere de disipadores más pequeños.

Desventajas:

Complejidad: Las fuentes conmutadas son más complejas en diseño y operación que las lineales. Esto puede aumentar el costo de fabricación y también el riesgo de fallas.

Ruido: Las fuentes de alimentación conmutadas pueden generar ruido eléctrico debido a la conmutación de alta frecuencia. Esto puede ser un problema en ciertas aplicaciones sensibles al ruido.

En conclusión: Las fuentes conmutadas son más eficientes y compactas, pero son más complejas y pueden generar ruido eléctrico. Dependerá en última instancia de las necesidades específicas de la aplicación.

4.3 El factor de potencia y la normatividad en las fuentes conmutadas,

Las fuentes conmutadas presentan en su función básica bajos factores de potencia en parte por desfaseamiento entre voltaje y corriente, además por las formas de onda del voltaje de alimentación y la corriente de entrada.

Las fuentes conmutadas para cumplir con normatividad y reducir el ruido generado por la conmutación implementan esquemas de “corrección de factor de potencia”, los cuales son circuitos electrónicos que provocan un consumo de corriente casi senoidal; los esquemas de corrección del factor de potencia son muy variados, desde los llamados “valley fill” (relleno del valle en la senoide de la línea eléctrica), hasta modificación de la conmutación para reconstruir la forma de onda de la corriente a senoidal.

El **factor de potencia** (FP) es un indicador cualitativo y cuantitativo del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, el factor de potencia es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo.

Como el factor de potencia cambia de acuerdo al consumo y tipo de carga, repasaremos algunos conceptos para expresar matemáticamente el factor de potencia.

La potencia asociada a un circuito puede definirse como la transferencia o utilización de la energía. En manera simple: si entre el voltaje y corriente de entrada a un circuito solo existe un corrimiento en fase entre ellos (desfasamiento solamente) causará transferencia de potencia tanto reactiva como resistiva, esta última es la que se convierte en trabajo; la potencia reactiva queda almacenada como campo eléctrico o magnético según sea la carga capacitiva o inductiva y por tanto se provoca un bajo factor de potencia, el cual se expresa en el llamado triángulo de potencias. Si además tenemos una forma de onda de la corriente no senoidal, sus componentes armónicos impactan también al factor de potencia, agregando esta distorsión de la corriente, el triángulo de potencias ya no expresa el factor de potencia. Por lo tanto, partiendo de una carga:

Para un circuito pasivo cualquiera, lineal o no lineal, alimentado por una tensión periódica puede definirse la potencia instantánea como:

$$P(t) = v(t) * i(t) \text{ Ecuación 4.8}$$

$P(t)$ potencia instantánea [W]

$v(t)$ tensión de alimentación [V]

$i(t)$ Corriente suministrada [I]

La potencia promedio o activa P_p está dada como:

$$P_p = \frac{1}{T} * \int_0^T v(t) * i(t) * dt \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde:

P_p = potencia promedio [VA]

T = periodo [Seg]

Cuando existen armónicos en las ondas de tensión y/o corriente, a $P(t)$ puede asociársele una descomposición en series de Fourier.

Para la tensión $v(t)$ y la corriente $i(t)$ pueden definirse los valores rms (root mean-square) como:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T v^2(t) * dt} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T i^2(t) * dt} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Para formas de onda compuestas por n y m armónicos de tensión y corriente respectivamente, pueden expresarse como:

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_i^2 + \dots + V_n^2} \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Donde V_i es el valor rms del i-esimo armónico de tensión ($i = 1, \dots, n$).

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_j^2 + \dots + I_m^2} \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Donde I_j es el valor del j-esimo armónico de corriente ($j = 1, \dots, m$).

Puede definirse la potencia aparente (S) para una fase como:

$$S = V_{rms} * I_{rms} [VA] \quad \text{Ecuación 4.14}$$

S representa la máxima capacidad de transferencia de energía del circuito, pero, en general, no expresa la naturaleza física (potencia real o reactiva).

Así qué: La eficiencia energética de un circuito puede definirse en términos de factor de potencia dado por:

$$FP = \frac{p_p}{S} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Las expresiones de las ecuaciones 4.14 y 4.15 son válidas para circuitos lineales y no lineales independientemente de la forma de onda de la excitación.

Para el caso particular de un circuito no lineal que está siendo alimentado por una tensión senoidal se tiene:

$$v(t) = \sqrt{2} * V_1 * \text{sen}(w_1 * t) \quad \text{Ecuación 4.16}$$

$$i(t) = \sqrt{2} * \sum_{j=1}^n I_j * \sin(j * \omega_1 * t + \theta_j) \quad \text{Ecuación 4.17}$$

V_1 es el pico máximo del voltaje senoidal a una frecuencia ω_1

Considerando que en la carga no lineal se presentan n armónicos de corriente, la potencia aparente está dada por

$$S = V_1 * \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_j^2 + \dots + I_m^2} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

La potencia activa esta expresada como:

$$P = V_1 * I_1 * \cos(\theta_1) \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde θ_1 , es el ángulo existente entre la componente fundamental de la tensión y la componente fundamental de la corriente y se tiene en cuenta que P está dada por los productos de las componentes de tensión y corriente de la misma frecuencia que están en fase.

El factor $\cos(\theta_1)$ se conoce como factor de desplazamiento.

La potencia reactiva Q está definida para este caso como la combinación de las componentes de corriente y tensión de la misma frecuencia desfasada 90° :

$$Q = V_1 * I_1 * \sin(\theta_1) \quad \text{Ecuación 4.20}$$

Es decir que en este caso la potencia reactiva está asociada solo a las componentes de la frecuencia fundamental. De acuerdo con ecuación 4.18 se ha establecido una descomposición de la potencia aparente dada por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \text{Ecuación 4.21}$$

Donde se involucra la componente D conocida como "Volts Ampers de Distorsión", cuya expresión es:

$$D(t) = V_1 * \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n I_j^2\right) - I_1^2} \quad \text{Ecuación 4.22}$$

La componente de distorsión (D), la potencia aparente para este caso, se define por la combinación de componentes de tensión y corriente de diferente frecuencia, y no está ligada

al almacenamiento de energía, pero contribuye a la reducción del factor de potencia. Esto significa que solo una parte de la diferencia entre potencia aparente y activa puede ser reducida utilizando bancos de condensadores existiendo un valor máximo de factor de potencia alcanzable por este medio, sin poderse garantizar en consecuencia, una compensación completa ($FP = 1$).

En el caso de una carga no lineal alimentada por una tensión senoidal dicha parte corresponde al valor de potencia reactiva Q , expresada por ecuación 4.20.

El factor de potencia para este caso está dado por ecuaciones 4.19 y 4.18

$$FP = \frac{V_1 * I_1 * \cos(\theta_1)}{V_1 * \sqrt{\sum_{j=1}^n I_j^2}} \quad \text{Ecuación 4.23}$$

Se puede observar que la componente Q , el factor de desplazamiento $\sin \theta_1$ se hace cero, de acuerdo con ecuación 4.21, pero el factor de potencia total (FP) de la carga NO llega a 1, debido a la presencia de armónicos de corriente en la carga. El valor máximo de factor de potencia obtenible al hacer $Q = 0$, expresado en términos de potencia dada por:

$$FP_{\max} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2}} \quad \text{Ecuación 4.24}$$

Donde se considera que ni la potencia activa (P) ni los "volts Amper de distorsión" (D) se ven afectados por la inclusión de un condensador en el circuito (suponiendo a este último sin pérdidas). Debe recalarse dos cosas para interpretar la ecuación 4.24:

Es aplicable al caso de un circuito no lineal alimentado por una tensión senoidal; es decir, no existe sobre la descomposición de la potencia aparente cuando el sistema (lineal o no lineal) es alimentado por una tensión no senoidal.

La suposición de que la tensión aplicada a la carga no lineal permanece senoidal implica que la fuente tenga una impedancia interna nula y por tanto no es real.

Sin embargo, el análisis anterior y las expresiones definidas (en especial las correspondientes a Q y D) son aplicables en los casos en que la distorsión de la onda de tensión sea despreciable.

Un problema de aplicación práctica de la definición de potencia y el cálculo del factor de potencia anterior es qué, métodos de compensación del factor de potencia van a implicar: inyección de corrientes reactivas, cancelación de armónicos, control de consumo de corriente de la carga, entre otros. Es evidente que se deberán agregar circuitos electrónicos para “corregir” el bajo factor de potencia de las fuentes conmutadas. En la actualidad existen dispositivos que contemplan esquemas de corrección del factor de potencia de manera muy inteligente.

Finalmente comentamos que el factor de potencia (FP) de un controlador debe cumplir lo especificado por la normatividad:

- Alto factor de potencia con un FP mayor o igual que 0.9
- Factor de potencia corregido con un FP mayor o igual que 0.85 y menor que 0.9
- Bajo factor de potencia con un FP menor que 0.85

El FP se determina mediante el método de pruebas establecido en la versión vigente de las normas siguientes:

- NMX-J-198-ANCE-2015 para controladores de lámparas fluorescentes.
- NMX-J-230-ANCE-2011 para controladores de lámparas DAI^[19].
- NMX-J-198-ANCE-2015 o la NMX-J-230-ANCE-2011 para cualquier otro tipo de controlador.

4.4 Fabricantes de DRIVERS para LEDS, algunos ejemplos

4.4.1 Fabricante: Power Integrations

Modelo del dispositivo: LNK603-606/613-616

^[19] DAI. Lámparas de Descarga de Alta Intensidad

Este dispositivo forma parte de una familia denominada LinkSwitchII^[20], simplifica drásticamente los diseños de fuentes conmutadas de CV/CC^[21] de bajo consumo al eliminar el optoacoplador del circuito de control por voltaje de secundario. El dispositivo introduce una técnica de control para proporcionar una regulación de corriente y voltaje de salida muy precisa, compensando las tolerancias de los parámetros internos y del transformador junto con las variaciones de voltaje de entrada.

Cualidades:

Dispositivo conmutador CV/CC preciso y de bajo consumo. Para adaptadores y cargadores.

Simplifica los convertidores CV/CC

Elimina el optoacoplador y elementos de los circuitos de control CV/CC secundarios.

Funciones de rendimiento avanzadas

Compensa las tolerancias de inductancia del transformador.

Compensa las variaciones de voltaje de la línea de entrada.

Compensa la caída de tensión del cable (serie LNK61X)

Compensa las variaciones de temperatura de los componentes externos.

Reduce el costo del filtro EMI^[22]

Se pueden lograr tolerancias de salida aún más estrictas con la selección/ajuste de resistencias externas.

Frecuencia de conmutación programable hasta 85 kHz para reducir el tamaño del transformador.

Funciones avanzadas de protección y seguridad:

^[20] LinkSwitchII, marca registrada por: Power Integrations

^[21] CV/CC Control por voltaje y control por corriente

^[22] EMI, filtro eliminador de ruido hacia la alimentación eléctrica

La protección de reinicio automático reduce la potencia entregada en >95 % en caso de cortocircuito de salida y fallas del lazo de control (componentes abiertos y en cortocircuito).

Apagado térmico con histéresis, con recuperación automática, reduce consumo de la fuente de alimentación al retorno.

Protección a la fuga de alto voltaje por el Drain del Mosfet.

Descripción funcional de LinkSwitchII

El LinkSwitchII controla la conmutación de un MOSFET de potencia de alto voltaje, contiene la fuente de alimentación en el mismo dispositivo. Es similar al LinkSwitchLP y al TinySwitchIII, utiliza control ON/OFF para regular el voltaje de salida; además, la frecuencia de conmutación se modula para regular la corriente de salida y proporcionar la característica de corriente constante. Este controlador LinkSwitchII consta de un oscilador, circuito de retroalimentación (detección y lógica), regulador de 6V, protección contra sobre temperatura, fluctuación de frecuencia, circuito de límite de corriente, supresión de borde de entrada, circuito de corrección de inductancia, control de frecuencia para regulación de corriente constante y máquina de estados ON/OFF para control tipo Voltaje Constante (CV).

Circuito de corrección de inductancia

Si la inductancia del primario del transformador es demasiado alta o demasiado baja, el convertidor lo compensará automáticamente ajustando la frecuencia del oscilador. Dado que este controlador está diseñado para funcionar en modo de conducción discontinua, la potencia de salida es directamente proporcional a la inductancia primaria establecida y su tolerancia se puede compensar por completo con ajustes en la frecuencia de conmutación.

Operación de corriente constante (CC)

A medida que aumenta el voltaje de salida y, por lo tanto, el voltaje de retorno a través del devanado de polarización, aumenta el voltaje de la terminal FEEDBACK. La frecuencia de conmutación se ajusta a medida que aumenta el voltaje de FEEDBACK para proporcionar una regulación de corriente de salida constante. El circuito de corriente constante y el circuito

de corrección de inductancia están diseñados para funcionar simultáneamente en la región CC.

Operación de voltaje constante (CV)

Si la terminal FEEDBACK se acerca a VFBth desde el modo de regulación de corriente constante, la fuente de alimentación pasa a la operación CV. La frecuencia de conmutación en este punto está en su valor máximo, correspondiente al punto de potencia pico de la característica CC/CV. El controlador regula el voltaje de la terminal FEEDBACK para que permanezca en VFBth utilizando una máquina de estados ON/OFF. El voltaje de FEEDBACK se muestrea 2.5 ms después del apagado del interruptor (Mosfet) de alto voltaje. Con cargas ligeras, el límite de corriente también se reduce para disminuir la densidad de flujo magnético del transformador.

Compensación del cable de salida

Esta compensación proporciona una tensión de salida constante en el extremo del cable en todo el rango de carga en modo CV. A medida que la carga del convertidor aumenta desde el estado sin carga hasta el punto de potencia máxima (punto de transición entre CV y CC), la caída de tensión introducida en el cable de salida se compensa aumentando la tensión de referencia de FEEDBACK. El controlador determina la carga de salida y, por lo tanto, el grado correcto de compensación en función de la salida de la máquina de estados. La compensación de caída de tensión del cable para un cable de 24 AWG (0.3 W) se selecciona con CBP = 1 μ F y para un cable de 26 AWG (0.49 W) con CPB = 10 μ F.

Reinicio automático y protección de lazo abierto

En caso de falla, como un cortocircuito en la salida o una condición de lazo abierto, el LinkSwitchII ingresa a un modo de protección apropiado como se describe a continuación:

En el caso de que el voltaje de FEEDBACK durante el período de retorno caiga por debajo de 0.7 V antes del retardo de muestreo de FEEDBACK (~2.5 ms) por una duración superior a ~450 ms (tiempo de encendido de reinicio automático (tARON), el convertidor entra en reinicio automático, en donde el MOSFET de potencia se desactiva durante 2 segundos (~18% del ciclo de trabajo de reinicio automático).

El reinicio automático activa y desactiva alternativamente la conmutación del MOSFET de potencia hasta que se elimine la condición de falla. Además de las condiciones para el reinicio automático descritas anteriormente, si la corriente de FEEDBACK detectada durante el período directo del ciclo de conducción (tiempo de "encendido" del interruptor) cae por debajo de 120 mA, el convertidor anuncia esto como una condición de lazo abierto (la resistencia superior en el divisor de potencial está abierta o falta) y reduce el tiempo de reinicio automático de 450 ms a aproximadamente 6 ciclos de reloj (90 ms), mientras mantiene el período de desactivación de 2 segundos.

Protección contra sobre temperatura

El circuito de apagado térmico detecta la temperatura del integrado. El umbral se establece en 142 °C, normalmente, con una histéresis de 60 °C. Cuando esta temperatura supera este umbral de 142 °C, el MOSFET de potencia se desactiva y permanece así hasta que la temperatura del chip desciende 60 °C, momento en el que se vuelve a activar.

Límite de corriente

El circuito de límite de corriente detecta la corriente en el MOSFET de potencia. Cuando esta corriente excede el umbral interno (ILIMIT), el MOSFET de potencia se apaga por el resto de ese ciclo. El circuito de supresión del borde delantero inhibe el comparador de límite de corriente durante un breve período (tLEB) después de que se enciende el MOSFET de potencia. Este tiempo de supresión del borde delantero se ha configurado de modo que los picos de corriente causados por la capacitancia y el tiempo de recuperación inversa del rectificador no provoquen la terminación prematura de la conducción del MOSFET. El LinkSwitchII también contiene una función de corrección "di/dt" para minimizar la variación de CC en todo el rango de la línea de entrada.

Regulador de 6.0 V

El regulador de 6 V carga el condensador de derivación conectado al pin BYPASS a 6 V extrayendo una corriente del voltaje en terminal DRAIN, siempre que el MOSFET esté apagado. El pin BYPASS es el nodo de voltaje de suministro interno. Cuando el MOSFET está encendido, el dispositivo funciona con la energía almacenada en el condensador de

derivación. El consumo de energía extremadamente bajo de los circuitos internos permite que el LinkSwitchII funcione de manera continua con la corriente extraída de la terminal DRAIN. Un valor de capacitor de derivación de 1 μF o 10 μF es suficiente tanto para el desacoplamiento de alta frecuencia como para el almacenamiento de energía.

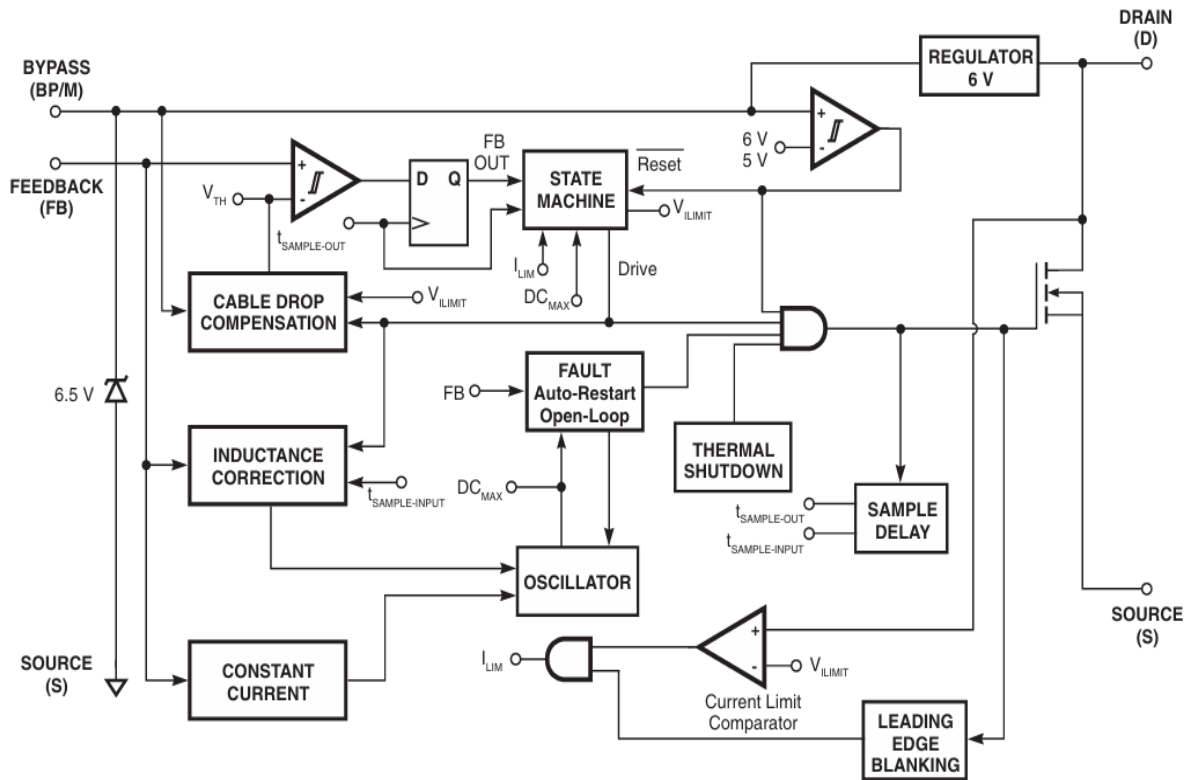


Figura 4.11 diagrama de bloques del LNK603-606/613-616

EJEMPLO DE APLICACIÓN

El CPC9909 es un controlador para fuentes artificiales de luz blanca con LEDS, de bajo costo, alta eficiencia y de alto brillo (HB)^[23] fabricado con el proceso BCDMOS^[24] de alto voltaje en SOI^[25] de la división de circuitos integrados de IXYS. Este controlador tiene un regulador interno que le permite operar desde 8 VCC hasta 550 VCC. Este amplio rango de voltaje operativo de entrada permite que el controlador se use en una amplia gama de aplicaciones de LEDS HB. El CPC9909 cuenta con modulación de frecuencia del pulso (PFM) con un esquema de control de corriente pico constante.

Este esquema de regulación es inherentemente estable, lo que permite que el controlador funcione por encima del 50 % del ciclo de trabajo sin inestabilidad de lazo abierto ni oscilaciones sub-armónicas.

La atenuación de LED se puede implementar aplicando un pequeño voltaje de CC a la terminal LD o aplicando una señal PWM de baja frecuencia a la terminal PWMD.

El CPC9909 está disponible en un paquete SOIC estándar de 8 terminales y un paquete SOIC de 8 terminales mejorado térmicamente con una almohadilla térmica expuesta (EP).

Características

- Rango de voltaje de entrada de 8 VCC a 550 VCC
- >90% de eficiencia
- Operación estable con un ciclo de trabajo de >50 %
- Controla varios LED en serie/paralelo
- Corriente LED regulada

^[23] HB. High Bright, Alto Brillo

^[24] BCDMOS

^[25] SOI

- Entradas de control de brillo lineal o PWM
- Tiempo mínimo de apagado programable por resistencia
- Paquete compatible con RoHS SOIC8
- Configuración Buck o Boost

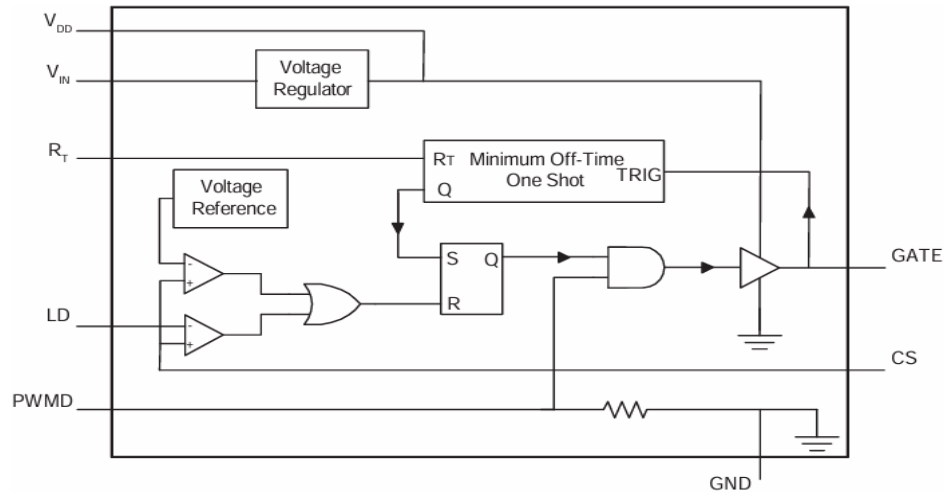


Figura 4.13 Diagrama de bloques

EJEMPLO DE LA APLICACIÓN

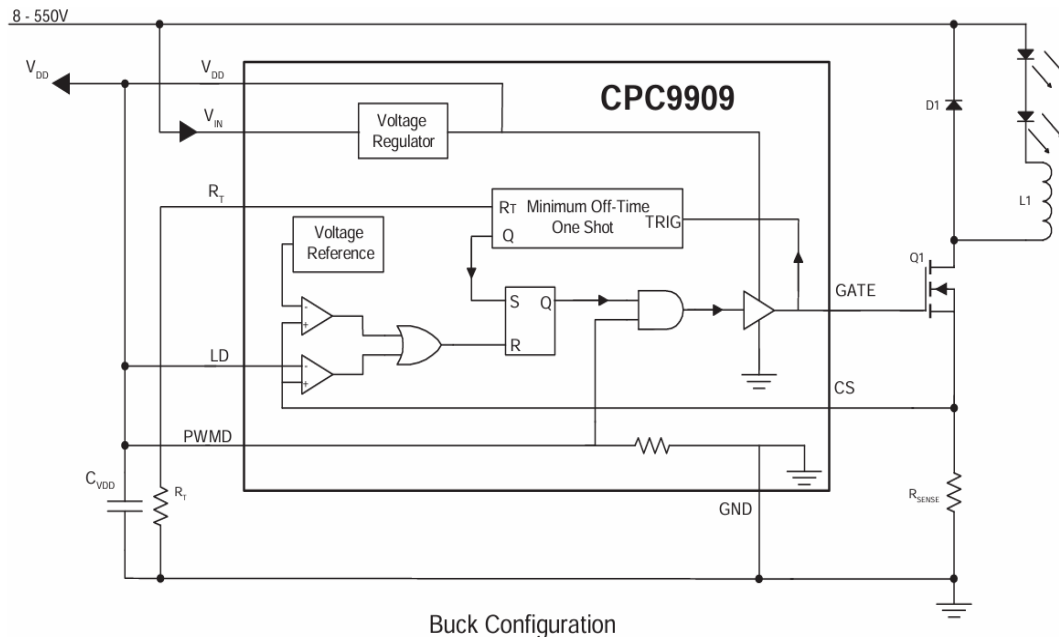


Figura 4.14 Aplicación Típica

APLICACIÓN TÍPICA

El CPC9909 controla lo LED mediante un esquema de modulación de frecuencia del pulso con corriente de pico limitada y tiempo de apagado mínimo. Este esquema de control es inherentemente estable y el controlador puede funcionar por encima de un ciclo de trabajo del 50 % sin inestabilidad de lazo abierto ni oscilaciones sub-armónicas. Dado que la frecuencia de conmutación depende de la corriente de carga del LED, se obtiene un funcionamiento de alta eficiencia

Teoría de funcionamiento

El circuito de aplicación típico se muestra en la Figura 4.14. Cuando el PWMD es alto, el circuito se habilita y el controlador enciende el MOSFET de potencia externo (Q1), lo que hace que la corriente del inductor (L1) aumente gradualmente hasta que el voltaje en la resistencia de detección de corriente (RSENSE) exceda VCS (alto). Cuando el voltaje en la terminal CS excede este umbral, el controlador apaga Q1.

Q1 permanece apagado durante el tiempo mínimo de apagado que es fijo. Mientras el interruptor está apagado, el inductor continúa suministrando corriente a la carga a través del diodo (D1). Cuando finaliza el tiempo de apagado, Q1 se enciende nuevamente hasta que se alcanza el límite de corriente pico. El umbral de límite de corriente pico se establece mediante la resistencia de detección externa, RSENSE, y el umbral de voltaje interno, VCS(high). Este umbral de voltaje interno también se puede establecer externamente a través de la terminal LD. El menor de estos dos umbrales y RSENSE establecen la corriente pico en el inductor. Se puede implementar una función de arranque suave aumentando el voltaje de CC en LD de 0 V a VCS (alto) a la velocidad deseada. Para utilizar la función de arranque suave, se conecta un divisor de resistencias de VDD a tierra y un capacitor de la terminal LD a tierra.

Regulador de voltaje de entrada

El CPC9909 tiene un regulador de voltaje interno que puede funcionar con voltajes de entrada que van desde 12 VCC hasta 550 VCC. Cuando se aplica un voltaje de CC mayor a 12 V en la terminal VIN, el regulador de voltaje interno regula el voltaje hasta un valor típico de 7.8 V. La terminal VDD es la salida del regulador de voltaje interno y debe colocarse por un

capacitor de bajo ESR^[26] para proporcionar una ruta de baja impedancia para el ruido de conmutación de alta frecuencia.

El controlador CPC9909 no requiere las resistencias de arranque que suelen ser necesarias para los controladores fuera de línea (offline controllers). El regulador de voltaje interno proporciona suficiente voltaje y corriente para alimentar los circuitos internos del CI. Este voltaje también está disponible en la salida VDD y se puede utilizar como voltaje de polarización para circuitos externos.

El regulador de voltaje interno se puede anular aplicando un voltaje de CC externo a la terminal VDD que sea ligeramente superior al voltaje del regulador generado internamente. Esto reduce la disipación de potencia del circuito integrado y es más adecuado en aplicaciones aisladas donde se puede utilizar un devanado auxiliar para accionar VDD.

La corriente de entrada total extraída de VIN es igual a la corriente de reposo extraída por el circuito interno (que se especifica en 0.6 mA como máximo) más la corriente del controlador hacia la compuerta del Mosfet.

Resistencia de detección de corriente

La corriente máxima del LED se establece mediante una resistencia de detección externa (RSENSE) conectada de CS a tierra. El valor de la resistencia de detección de corriente se calcula en función de la corriente LED promedio deseada, el umbral de detección de corriente y la corriente de rizo del inductor.

Supresión de detección de corriente

El CPC9909 tiene un circuito interno de supresión de detección de corriente. Cuando se activa el MOSFET de potencia, el inductor externo puede provocar un pico no deseado en la terminal de detección de corriente, lo que inicia una terminación prematura del pulso de compuerta. Para evitar esta condición, se implementa un tiempo de supresión de borde de entrada interno típico de 400 ns, eliminando así la necesidad de filtrado RC externo y simplificando el diseño. Durante el tiempo de supresión de detección de corriente, el

^[26] ESR componente

comparador de límite de corriente se desactiva, lo que evita que el circuito de control de salida termine la señal de control de compuerta.

Habilitar/Deshabilitar Función

Al conectar la terminal PWMD a VDD se habilita el controlador de compuerta. Al conectar PWMD a GND se deshabilita el controlador de compuerta y se pone el dispositivo en modo de espera. En modo de espera, la corriente de reposo es de 0.6 mA como máximo.

Tiempo mínimo de apagado de un disparo

El CPC9909 utiliza un esquema de control de tiempo de inactividad fijo. El tiempo mínimo de apagado se establece mediante una resistencia externa conectada entre las terminales RT y GND.

4.5 Selección del driver a implementar

Con el objetivo de diseñar una fuente de control para leds blancos de bajo costo se decidió seleccionar del fabricante **ONSEMI** [27], el driver **FL7701**

Smart LED Lamp Driver IC with PFC Function FL7701

Controlador de sistemas de iluminación LEDS inteligente, con función de corrección de factor de potencia [PFC] [28]

Descripción general:

Controlador de lámpara LED FL7701 es un dispositivo integrado con función PFC.

La técnica especial definida como: "digital adaptada" del dispositivo puede detectar automáticamente la condición de voltaje de entrada y enviar una señal de referencia interna para lograr un factor de potencia alto. Cuando se aplica una entrada de Corriente Alterna al

[27] ONSEMI. Semiconductors Components Industries

[28] PFC. Power Factor Correction, Corrección del Factor de Potencia

dispositivo, la función PFC se habilita automáticamente, de lo contrario, cuando se aplica una entrada de Corriente Continua al driver, la función PFC se deshabilita automáticamente.

El FL7701 no necesita un capacitor (capacitador electrolítico comúnmente) para la estabilidad del voltaje de alimentación de los LEDS, lo que puede afectar significativamente al sistema de lámpara LED.

Características

- Función PFC activa implementada digitalmente (sin circuito adicional para PF alto)
- Circuito de suministro de alto voltaje incorporado: polarización automática
- Rango de entrada de la aplicación: 80 VCA ~ 308 VCA
- Función AOCP [²⁹] con modo de reinicio automático
- Función de protección contra sobret temperatura incorporada
- Límite de corriente CONTROLADO ciclo por ciclo
- Protección contra apertura de terminal de detección de corriente (CS) [³⁰]
- Baja corriente de funcionamiento [consumo]: 0.85 mA (típico)
- Bloqueo por BAJO VOLTAJE con histéresis de 5 V
- Frecuencia de oscilación programable
- Corriente de LEDS programable
- Función de atenuación analógica
- Función de arranque suave
- Referencia interna precisa: $\pm 3\%$

[²⁹] AOCP. Abnormal Over Current Protection.

[³⁰] CS. Current Sense

APLICACIÓN TÍPICA

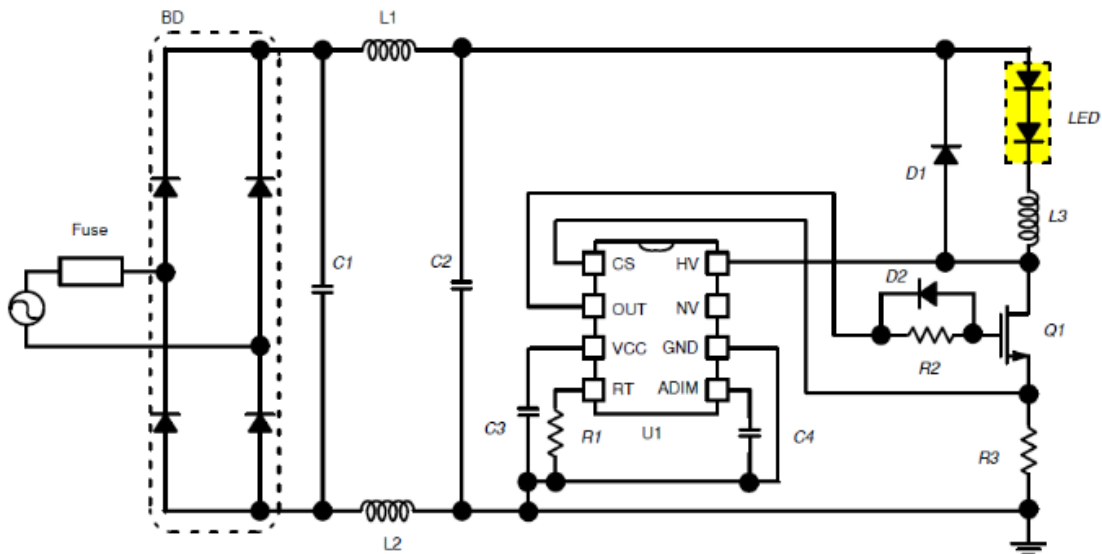


Figura 4.15 Aplicación típica del driver FL7701

DIAGRAMA A BLOQUES DEL DISPOSITIVO

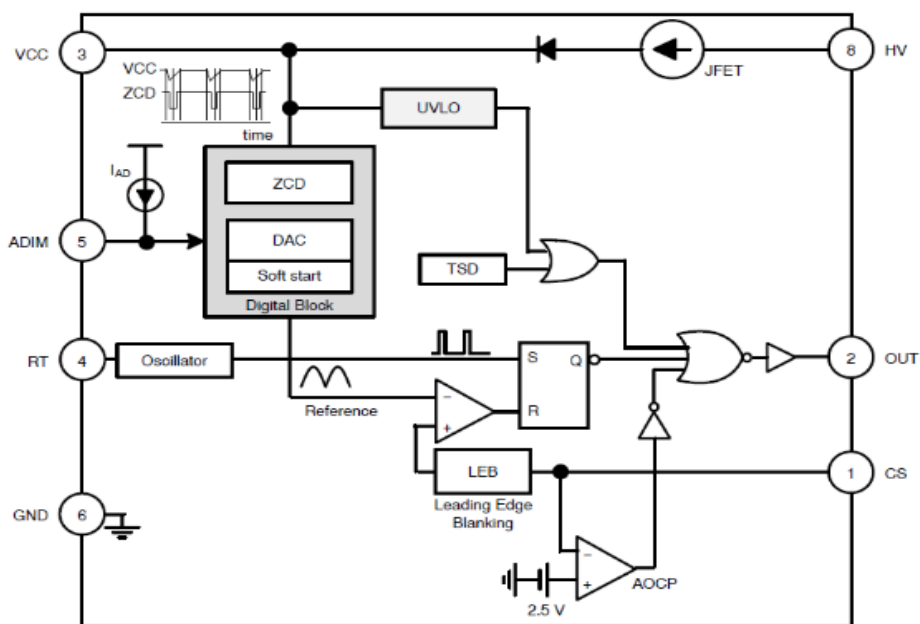


Figura 4.16 Diagrama general de bloques internos del driver FL7701

CONFIGURACIÓN DE TERMINALES

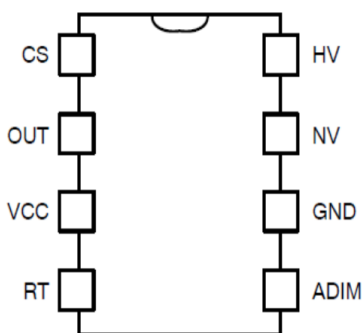


Figura 4.17 Disposición de terminales del FL7701

TABLA DE DEFINICIONES DE TERMINALES

TERMINAL	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	CS	DETECCIÓN DE CORRIENTE. Limita la corriente de salida según el voltaje de la resistencia de detección. El CS también se utiliza para configurar la regulación de corriente del LED.
2	OUT	SALIDA. Se conecta a la compuerta del MOSFET.
3	VCC	VOLTAJE DE FUENTE DEL INTEGRADO. TERMINAL de suministro para funcionamiento estable del DISPOSITIVO. Detección de señal cruce por cero de la corriente (ZCD) utilizada para función de corrección de factor de potencia (PFC) precisa.
4	RT	RESISTENCIA DE TIMER. Frecuencia de operación programable mediante resistencia externa, también el dispositivo tiene una frecuencia prefijada.
5	ADIM	ATENUACIÓN ANALÓGICA. Conectada a la fuente de corriente interna, puede cambiar la corriente de salida usando una resistencia externa. Si no se utiliza ADIM, se recomienda conectar un condensador de derivación de 0.1 uF entre el ADIM y GND.
6	GND	REFERENCIA DE POTENCIAL para el dispositivo
7	NV	SIN CONEXIÓN
8	HV	ALTO VOLTAJE. Conectar a la línea de alto voltaje de entrada, suministra corriente al dispositivo para su funcionamiento, entre otras funciones.

Tabla 4.1 Funcionamiento de terminales del FL7701

TABLA DE VALORES ABSOLUTOS MÁXIMOS

SÍMBOLO	PARÁMETRO	MÍNIMO	MÁXIMO	UNIDADES
V _{CC}	Voltaje de polarización del dispositivo	----	20	V
HV	Voltaje de entrada	----	500	V
I _{O+} /I _{O-}	Corriente de salida al Mosfet (fuente/sumidero)	----	250	mA
V _{ADIM}	Voltaje de atenuación	----	5	V
V _{RT}	Voltaje en terminal del Timer	----	5	V
V _{CS}	Voltaje de entrada al detector de corriente	----	5	V
T _A	Rango de temperatura de operación ambiente	-40	+125	°C
T _J	Temperatura de operación de unión	-40	+150	°C
T _{STG}	Rango de temperaturas de almacenamiento	-65	+150	°C
θ _{JA}	Resistencia térmica de unión al ambiente	----	135	°C/W
P _D	Potencia de disipación del dispositivo	----	660	mW
ESD	Capacidad de descarga estática		1000/2000	V

Tabla 4.2 Especificaciones de funcionamiento máximas del FL7701

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (Los valores típicos son a T_A = + 25 °C. Las especificaciones a – 40 °C ~ 125 °C están garantizadas por diseño. (Basados en los resultados de caracterización final).

SECCIÓN DE POLARIZACIÓN

SÍMBOLO	PARÁMETRO	CONDICIONES	MIN	TÍPICO	MÁX	UNIDAD
V _{CC}	Voltaje del regulador	V _{HV} = 100 V _{DC}	14.0	15.5	17.0	V
V _{CCST+}	Umbral de paso positivo	V _{CC} incrementando	12	13	14	V
V _{CCST-}	Umbral de paso de bajada	V _C decrementando	7	8	9	V
V _{CCHY}	Umbral de Histéresis		4	5	6	V
I _{HV}	Corriente de la terminal HV	V _{HV} = 100V _{DC} C _L = 150 pF, RT = Abierta	----	0.85	1.10	mA
I _{ST}	Corriente de encendido		----	120	150	μA

Tabla 4.3 Especificaciones de polarización recomendadas para el FL7701

SECCIÓN DE CONMUTACIÓN

SÍMBOLO	PARÁMETRO	CONDICIONES	MIN	TÍPICO	MÁX	UNIDAD
f _{OSC}	Frecuencia de operación	RT = 5.95 kΩ	200	250	300	kHz
		RT = 87 kΩ	16	20	24	kHz
		RT = abierta	40.5	45.0	49.5	kHz
t _{MIN}	Tiempo mínimo de encendido (OUT)		----	400	----	ns
D _{MAX}	Máximo ciclo de trabajo		----	50	----	%
t _{LEB}	Tiempo de apagado (OUT), no probado 100% en producción		----	350	---	ns
V _{RT}	Voltaje de referencia en terminal RT		----	1.5	----	V

Tabla 4.4 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701

SECCIÓN DE ENCENDIDO SUAVE

SÍMBOLO	PARÁMETRO	CONDICIONES	MIN	TÍPICO	MÁX	UNIDAD
t _{SS}	Tiempo de encendido suave (no garantizado)	Modo DC	48	60	72	ms
		Modo AC	----	7	----	Períodos

Tabla 4.5 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701

SECCIÓN DE SENSOR DE CORRIENTE REFERENCIA

SÍMBOLO	PARÁMETRO	CONDICIONES	MIN	TÍPICO	MÁX	UNIDAD
V _{CS1}	Referencia de voltaje interna en terminal CS	Modo DC	0.354	0.365	0.376	V
V _{CS2}		Modo AC	0.485	0.500	0.515	

Tabla 4.6 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701

SECCIÓN DE PROTECCIONES

SÍMBOLO	PARÁMETRO	CONDICIONES	MIN	TÍPICO	MÁX	UNIDAD
OVP _{VCC}	Protección a sobre voltaje en la terminal VCC		17.7	18.7	19.7	V
V _{AOCP}	Nivel No-normal de protección a sobrecorriente en terminal CS		----	2.5	----	V
t _{AOCP}	Tiempo de detección de nivel No normal		----	70	----	ns
t _{TSDH}	Umbral de apagado por sobrettemperatura		140	150	----	°C
t _{TSDHY}	Amplitud de Umbral de apagado por sobrettemperatura		----	50	----	°C

Tabla 4.7 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701

SECCIÓN DE ATENUACIÓN

SÍMBOLO	PARÁMETRO	CONDICIONES	MIN	TÍPICO	MÁX	UNIDAD
V _{ADIM(ST+)}	Umbral de subida de la atenuación analógica		3.15	3.50	3.85	V
V _{ADIM(ST-)}	Umbral de caída de la atenuación analógica		----	0.50	0.75	V
I _{AD}	Fuente de corriente interna para la terminal ADIM		9	12	15	µA

Tabla 4.8 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701

DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO

El FL7701 es un controlador básico por modulación de ancho de pulso (PWM) para una topología de convertidor reductor Buck en operación de Modo de Conducción Continua

(CCM) ^[31], con función de corrección del factor de potencia usando un algoritmo de control digital implementado en el dispositivo.

El integrado contiene un circuito de polarización que usa un dispositivo de conmutación de alto voltaje; no requiere de una fuente auxiliar para el VCC típica para el control con estos tipos de dispositivos.

Cuando la entrada de voltaje está entre 25 y 500V, el FL7701 mantiene 15.5 V en VCC para operar de manera estable. El FL7701 tiene funciones de modo de bloqueo UVLO ^[32] que cuando el voltaje VCC aumenta por encima de VCCST+, el bloque UVLO interno se libera y el dispositivo comienza a funcionar, de lo contrario, si el VCC desciende a VCCST- el funcionamiento del IC se detiene. Normalmente, la función de histéresis de este bloque proporciona un funcionamiento estable incluso si el voltaje de entrada funciona en circunstancias muy ruidosas o inestables.

El FL7701 tiene un bloque digital interno inteligente para determinar la condición de entrada: CA o CC. Cuando se aplica una fuente de CA de 50 Hz o 60 Hz al dispositivo, cambia automáticamente su señal de referencia interna, que es similar a la señal de entrada, para corregir a un factor de potencia alto. De lo contrario, una vez que la fuente de CC se conecta al dispositivo, la referencia interna cambia inmediatamente a CC.

FUNCIÓN DE ARRANQUE SUAVE

El FL7701 tiene una función de arranque suave interna para reducir la corriente de entrada al inicio. El CI comienza a funcionar siguiendo una secuencia interna, la referencia interna aumenta lentamente durante un tiempo fijo predeterminado. Después de este período transitorio, la referencia interna pasa a un nivel de estado estable. En este tiempo, el CI intenta continuamente encontrar información de fase desde la terminal VCC. Si logra obtener información de fase, automáticamente sigue una referencia de forma similar realizada

^[31] CCM. Uno de los modos de funcionamiento de las fuentes conmutadas.

^[32] UVLO. Under Voltage Look Out. Bloqueo por bajo voltaje

durante los tiempos transitorios, lleva determinar este encendido suave 7 períodos, si no, el FL7701 conmuta a un nivel de referencia de CC. La figura 4.18 muestra el encendido.

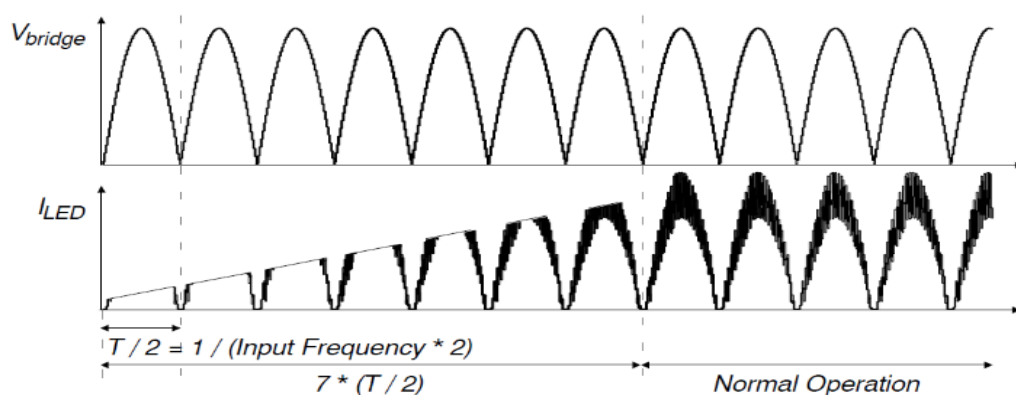


Figura 4.18 *Secuencia de arranque o encendido del FL7701*

FUNCIÓN PFC INTERNA: CÓMO LOGRAR ALTO FACTOR DE POTENCIA

El FL7701 tiene una función PFC interna simple pero inteligente que no requiere terminales adicionales para detectar información de fase de entrada o un capacitor electrolítico para estabilizar la tensión de alimentación; para lograr un PF alto, el FL7701 no utiliza un capacitor de rectificación después del puente de diodos, esto es importante porque el CI en su lugar, utiliza la fluctuación de la señal en la terminal de VCC.

La terminal VCC, que suministra energía al CI, tiene la ondulación de voltaje, así como el voltaje de rectificación después del puente, cambiando el nivel de voltaje de acuerdo con el valor del capacitor en VCC. Al usar este tipo de fluctuación de voltaje en VCC, el CI puede detectar la referencia de tiempo y crear la señal de cruce por cero (ZCD) ^[33] interna.

Para una referencia interna precisa y confiable de la señal de voltaje de entrada, el FL7701 utiliza la técnica digital (modulación sigma/delta) y crea una nueva señal interna (DAC_OUT) que tiene la misma fase que el voltaje de entrada, como se muestra en la figura 4.19. Esta señal ingresa al comparador final y se compara con la información en tiempo real de la resistencia de detección.

^[33] ZCD. Zero Croosing Detector. Detector de Cruce por Cero

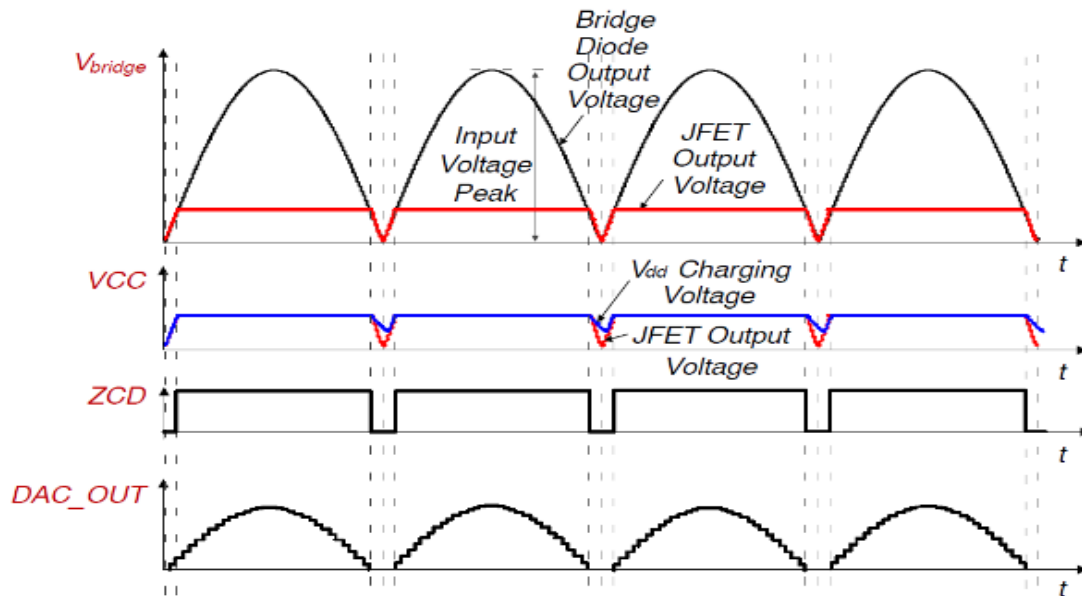


Figura 4.19 Generación de la referencia interna de la señal seno de entrada al CI, con un modulador sigma /delta.

Nota: Un modulador Sigma/Delta clásico de primer orden está compuesto por un integrador, un muestreador, un cuantificador uniforme de un bit y un convertidor D/A en el camino de realimentación, como se muestra en la figura 4.20.

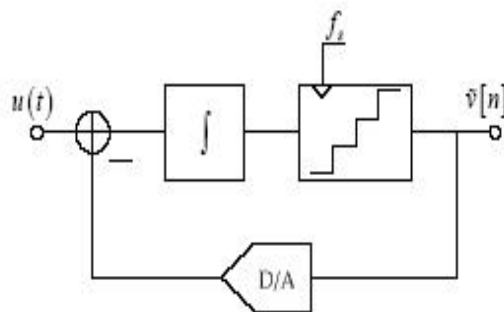


Figura 4.20 Modulador sigma/delta ejemplo

Función de autopolarización

La función de autopolarización, utiliza una fuente de corriente de alto voltaje, puede suministrar suficiente corriente de funcionamiento al CI y garantizar un tiempo de arranque similar en todo el rango de voltaje de entrada (80 V ~ 308 VCA). Sin embargo, la autopolarización tiene una debilidad en condiciones de alto voltaje: El regulador derivado

del alto voltaje actúa como una fuente de corriente constante, por lo que tiene más pérdidas de potencia cuanto más alto es el voltaje de entrada a la terminal HV. Esta pérdida de potencia es proporcional al voltaje de entrada. Para reducir esta pérdida de potencia, una de las posibles soluciones es una resistencia adicional entre la fuente de voltaje de entrada y la terminal de alto voltaje y en serie con los leds, como se muestra en la figura 4.21.

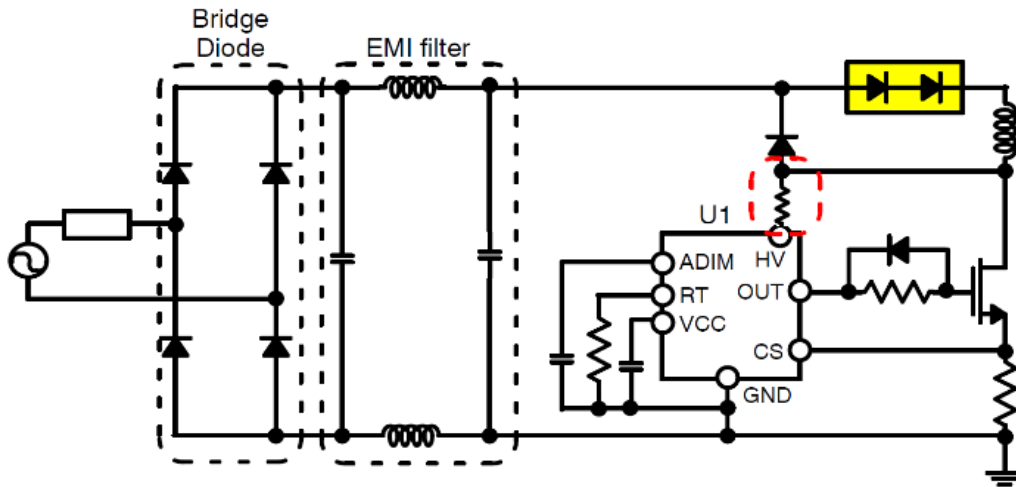


Figura 4.21 Opción para disminuir potencia de pérdida por polarización del FL7701 en líneas de alto voltaje.

Función de atenuación

El FL7701 utiliza la entrada ADIM para atenuación analógica o de 0 a 10 V mediante un divisor resistivo. El voltaje pico de referencia interna, que es la señal DAC_OUT en la figura 4.15, se modifica según el nivel V_{ADIM} , como se muestra en la figura 4.22.

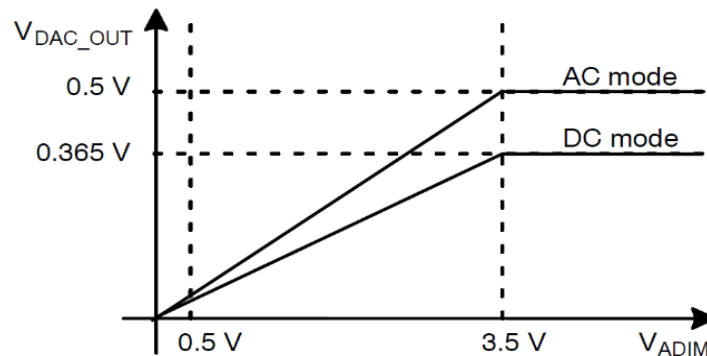


Figura 4.22 Atenuación por divisor resistivo en terminal ADIM

Diseño del inductor

El rango de la relación del ciclo de trabajo (PWM) interna prefijada del FL7701 es inferior al 50 %, o alrededor de 400 ns, desde el punto de vista de la temporización. El rango depende del voltaje de entrada y de la cantidad de LED en cadena.

El mínimo ciclo se determina así:

$$D_{min} = \frac{nV_f}{\eta V_{(m\acute{a}x)}} \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Donde:

η es la eficiencia del sistema

$V_{in(m\acute{a}x)}$ es el voltaje máximo de entrada

V_f es el voltaje de conducción de un LED del arreglo

n es el número de LEDS en cadena

El inductor requerido para el control de la corriente de LEDS depende del modo de conducción del convertidor Buck, de acuerdo a la figura 4.23 podemos determinar el valor del mismo de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

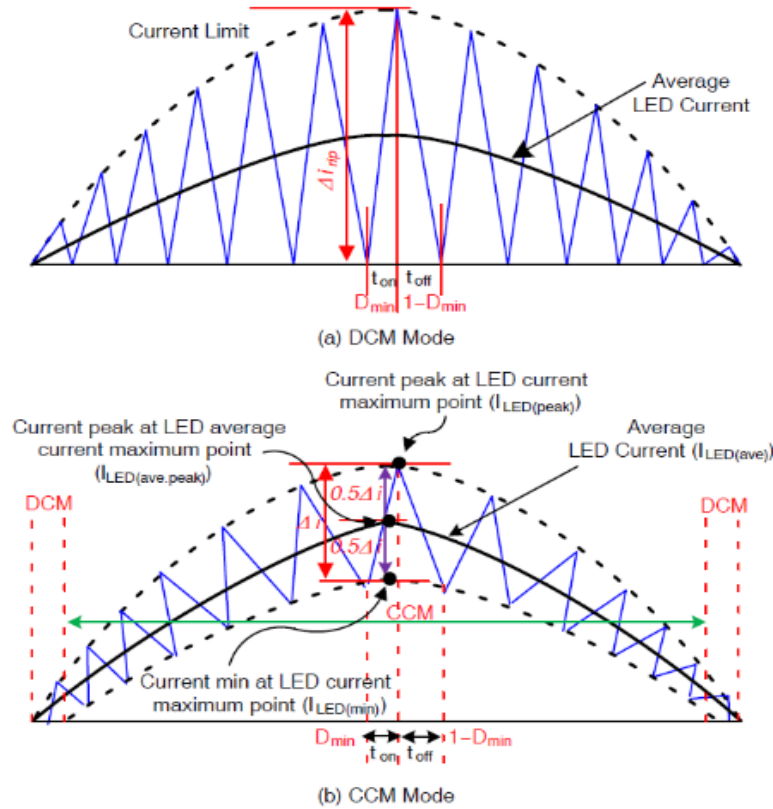


Figura 4.23 Corriente de los LEDS de acuerdo al modo de operación del convertidor.

En el modo de conducción discontinua (DCM), la inductancia es:

$$L_m = \frac{nV_f(1-D_{min})}{f_s \Delta i_{rip}} [H] \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Si la corriente pico se fija en mA pico, ver figura 4.23 marcada como “ave.peak”, la fórmula para la corriente máxima es:

$$I_{LED(ave.peak)} = \Delta i_{con} + \frac{\Delta i_{rip}}{2} [A] \quad \text{Ecuación 4.27}$$

En el FL7701, la corriente RMS en los LEDS determina el valor de la inductancia. Para el modo de conducción continua CCM, se define primero esta corriente de acuerdo a:

$$I_{LED(rms)} = \frac{I_{LED(ave.peak)}}{\sqrt{2}} [A] \quad \text{Ecuación 4.28}$$

Sustituyendo la corriente definida por la ecuación 4.28 en la ecuación 4.6 se obtiene el valor de la inductancia requerida.

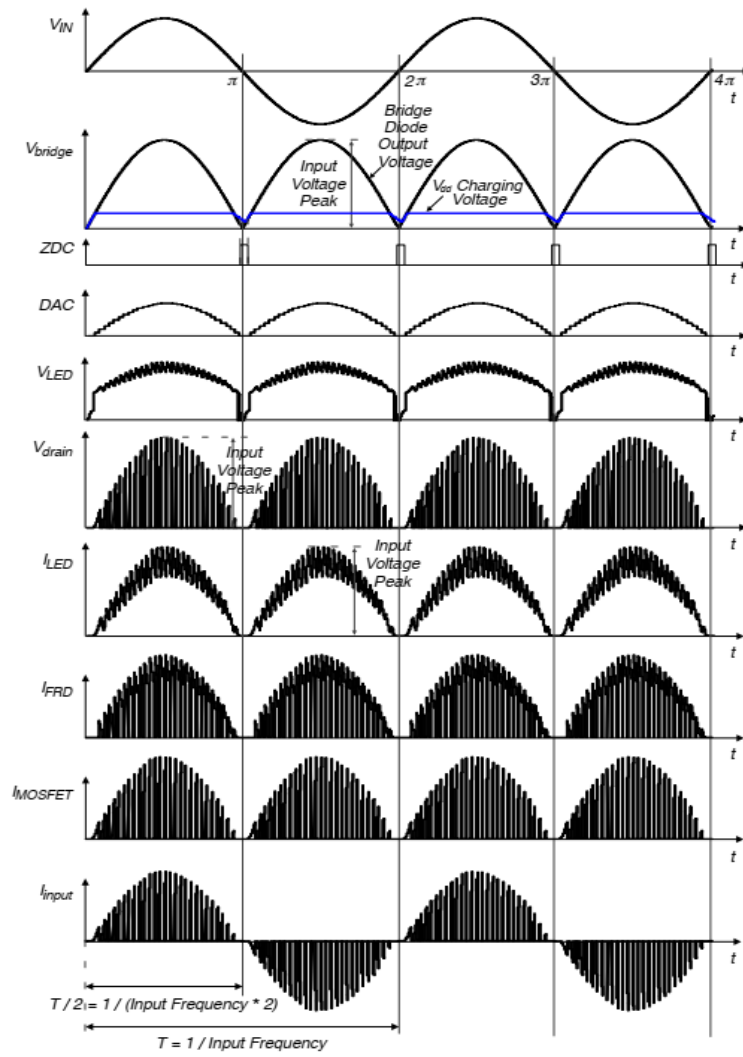


Figura 4.24 Características típicas de funcionamiento del driver.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

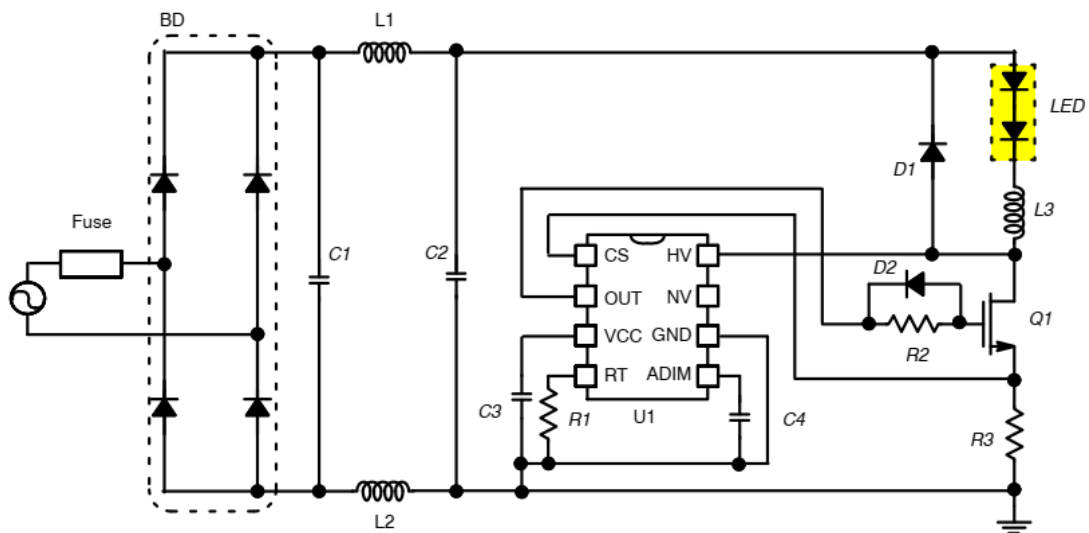


Figura 4.25 Sin capacitor en cadena de LEDS.

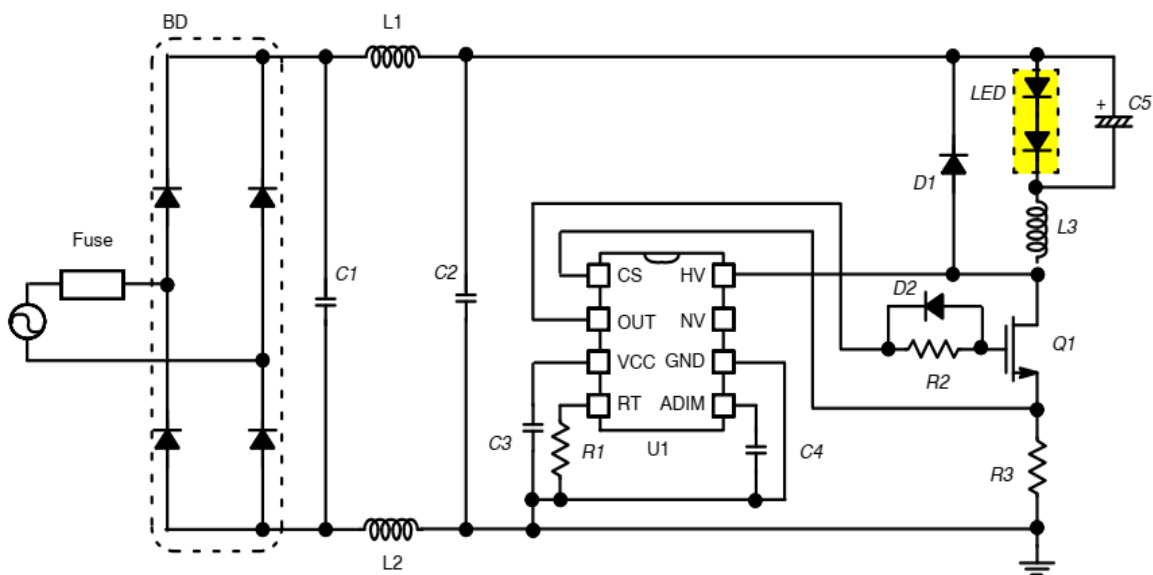


Figura 4.26 Con capacitor en LEDS

CAPITULO V IMPLEMENTACIÓN.

5.1 Procedimiento de diseño recomendado por el fabricante ONSEMI

Tomando del documento de diseño del fabricante, referencia, el procedimiento de diseño es el siguiente:

Se inicia con las especificaciones objetivo del controlador, definiendo:

Voltaje de entrada máximo $V_{AC}(rms)$, $V_{in}(max)$

Voltaje de salida del controlador, dado por el voltaje de encendido del led, V_F y en número de leds del arreglo n , por ejemplo: $V_F=3.5\text{ V}$, $n=10$, $V_o = 3.5 \times 10 = 35\text{ Vdc}$

Corriente pico del arreglo de LEDS, $I_{LED}(pico)$

Corriente rms del arreglo, $I_{LED}(rms)$

Eficiencia del controlador propuesta, η

Frecuencia de operación del controlador, kHz

Paso 1: Calculo del ciclo de trabajo mínimo del PWM:

$$D_{min} = \frac{n V_f}{\eta * V_{in(max)}} \quad \text{Ecuación 5.1, D debe estar entre 2 y 50\%}$$

Paso 2: Calculo del ciclo de trabajo máximo del PWM:

$$V_{in(min)} = \frac{n V_f}{\eta * D_{max}} \quad \text{Ecuación 5.2, Dmax es 50\% (0.5)}$$

Paso 3: Máximo tiempo Encendido/Apagado:

$$t_{on} = t_{off} = \frac{1}{2(f_s)} \quad \text{Ecuación 5.3, } F_s = 45\text{ kHz}$$

Paso 4: Calcular la corriente de rizo del arreglo, Δi :

$$\Delta i = 2(I_{LED(PICO)} - \sqrt{2} * I_{LED(rms)}) \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Paso 5: Inductancia, L :

$$L = \frac{(V_f * n)(1 - D_{min})}{f_s * \Delta i} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Paso 6: Resistor de sensado/detección de la corriente de leds, R:

$$R = \frac{V_{CS}}{I_{LED(pico)}} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Paso 7: Resistor que determina la frecuencia de operación, R_t:

$$R_t = \frac{1}{f_s} * 2.0213 \times 10^9 \quad \text{Ecuación 5.7}$$

5.2 Especificaciones del driver

Cálculo de componentes

Se realizó con base a la hoja de datos del integrado el cálculo del inductor y de los demás componentes mediante el uso de las fórmulas que mostradas en el apartado 5.1.

Frecuencia	45kHz
Voltaje de salida	24vdc
Corriente rms led	0.625 Arms
Corriente pico led	1 Apico
Voltaje max de entrada	350 Vac
eficiencia	0.95

Tabla 5.1 Especificaciones de la propuesta.

Utilizando el procedimiento del apartado 5.1, sustituyendo valores en las ecuaciones respectivas:

Paso 1 Encontrar ciclos de trabajo, el integrado maneja mínimo 2% y máximo 50%

$$D_{min} = \frac{24}{(0.95 * 350)} = 0.072 = 7.2\%, \text{ cumple al ser superior al } 2\%$$

Paso 2 Determinar el voltaje de entrada mínimo

$$V_{in(min)} = \frac{24}{(350 * 0.5)} = 50.53 \text{ Vac, cumple}$$

Paso 3 Determinar los tiempos de on y off del MOSFET

$t_{on} = t_{off} = \frac{1}{2(45kHz)} = 1.11 \times 10^{-5}$ seg, estos tiempos los debe cumplir el Mosfet que se determine.

Paso 4 Calcular la corriente de rizo en los LEDS

$$\Delta i = 2(1 - \sqrt{2}) * 0.625 = 0.23225 \text{ A}$$

Paso 5 Calcular el inductor

$$L = \frac{(24 * (1 - 0.072))}{45 \times 10^3 * 0.23225} = 0.0021 \text{ H}$$

Paso 6 Resistencia de sensado

$$R = \frac{V_{CS}}{I_{LED(pico)}} = \frac{0.5}{1} = 0.5 \Omega$$

Paso 7 Resistencia de la frecuencia

$$R_t = \frac{1}{45 \times 10^3} * 2.0213 \times 10^9 = 44.917 \times 10^3 \Omega$$

Nota: Si la terminal RT se deja en circuito abierto, la frecuencia la determina el sistema con 45 kHz.

Se calculó también con la hoja Excel proporcionada por el fabricante, la figura 5.1 a continuación muestra los resultados.

FL7701 SYSTEM Calculation(Method2)				
Item		Value	Units	
Be inserted Input items	Maximun Input Voltage	$V_{in,max,ac}=$	350	[V]
	LED Forward Voltage	$V_f=$	3	[V]
	Number of LED	Number of LED =	8	[EA]
	LED Peak Current	$I_{LED,peak}=$	1000	[mA]
	LED rms current	$I_{vae,rms}=$	625	[mA]
	Efficiency	$E_{ff}=$	95	[%]
	Switching Frequency	$f_{sw}=$	45	[kHz]
Results	Current ripple	$\Delta I=$	232.2	[mA]
	LED min. Current	$I_{min}=$	767.77	[mA]
	LED current ave_pk	$(I_{max}+I_{min})/2=$	884	[mA]
	Minimum Duty	$D_{min}=$	5.105	[%]
	Output Voltage	$V_o=$	24.000	[V]
Results	Inductance	$L_m=$	2.179	[mH]
	Current Sensing Resistor	$R_{cs}=$	0.500	[Ω]
	Frequency Setting Resistor	$R_t=$	44.919	[k Ω]
Expected output power		$P_{out}=$	15.000	[W]
Expected Input power		$P_{in}=$	15.789	[W]

Figura 5.1 Hoja de cálculo proporcionada por ONSEMI

5.3 Diseño del inductor

Existe mucha literatura para el diseño de transformadores e inductores, en nuestro caso partiremos de la ecuación que define la “geometría del circuito magnético” del inductor de acuerdo a la potencia que debe manejar. De acuerdo a los parámetros y factores que define Colonel T. Mclyman, la cual es:

$$A_p = \frac{VA(10^4)}{K_f K_u B_{ac} f J}, \text{ cm}^4 \quad \text{Ecuación 5.8}$$

Donde:

A_p es el producto del área transversal del núcleo (A_c) y la Ventana para alojar el devanado (W_a), que se determinan de la geometría del circuito magnético (EE, EI, C, Toroide, etc.)

$$A_p = A_c * W_a \text{ cm}^4 \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Por ejemplo, para una geometría EE:

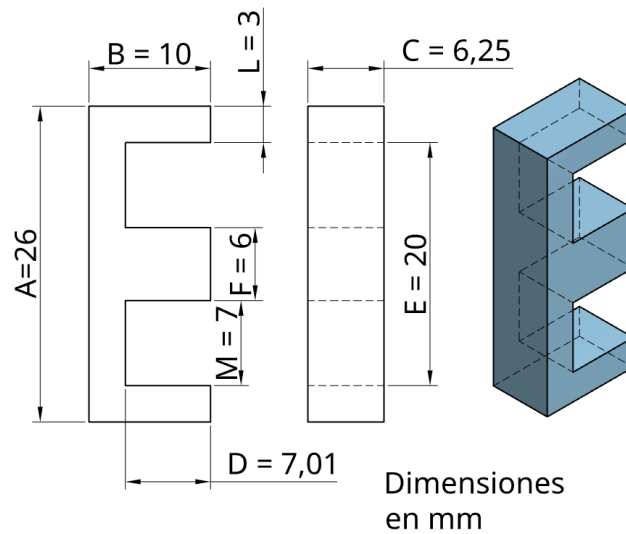


Figura 5.2 EE1425

$$A_c = C \times F \text{ cm}^2$$

$$W_a = 2D \times M \text{ cm}^2$$

K_u es el factor de utilización de la ventana.

K_f es un coeficiente constante que depende de la forma de onda.

K_j es una constante que está relacionada al incremento de temperatura.

f es la frecuencia de operación, Hz.

B_m es el flujo máximo, tesla.

Para la EE1425 mostrada en la figura 5.2: **$A_p = 0.625 \times 0.6 \times 2 \times 0.701 \times 0.7 = 0.368025 \text{ cm}^4$**

Por otro lado, la ecuación 10-2 de Mclyman es aplicable a transformadores e inductores de baja frecuencia, por lo que se requiere tomar en cuenta los efectos que las frecuencias altas tienen en esta ecuación 5.8.

Para nuestro caso tomamos para diseñar nuestro inductor la sugerencia de diseño de inductores para alta frecuencia determinada por el Ingeniero Roger Efraín Carrillo Díaz [v],

que define el producto de áreas para el diseño de transformadores e inductores en el capítulo 4 de su Tesis con:

Para transformadores:

$$A_P = \left(\frac{p_t * 10^4}{K_U K_J B_M f} \right)^{(X)} \text{ cm}^4 \quad \text{Ecuación 5.10}$$

Donde

Pt es la potencia total del transformador

Ku es el factor de utilización de la ventana.

Kj es una constante que está relacionada al incremento de la temperatura.

Bm es el flujo máximo, Tesla.

f es la frecuencia de operación, Hz.

X es un factor que depende de la geometría del núcleo, para nuestro caso $x=9/8= 1.125$.

Para inductores:

$$A_P = \left(\frac{2(Energia) * 10^4}{B_m K_u k_j} \right)^{(X)} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

$$\text{Energía es: } E = \frac{1}{2} L I^2$$

x es un factor que depende de la geometría del núcleo, para nuestro caso $x=9/8= 1.125$.

Bm es el flujo máximo, tesla.

Ku es el factor de utilización de la ventana.

Kj es una constante que está relacionada al incremento de la temperatura.

El Ing. Roger Carrillo propone en su Tesis el siguiente procedimiento para el diseño de inductores cuya operación es en altas frecuencias, partiendo de su producto de áreas Ap (tabla 4-3, página 75 de la tesis). Reproducimos estos pasos en la Tabla 5.2 y los aplicaremos en nuestra propuesta.

Paso	Descripción	Símbolo	Ecuación	Unidades
1	Inductancia deseada	L	Depende de la aplicación	H
2	Corriente de operación	I _o	Depende de la aplicación	A
3	Corriente de rizo	ΔI	Depende de la aplicación	A ac
4	Corriente total	I	$I = I_o + \Delta I$	A
5	Frecuencia de operación	f	Depende de la aplicación	Hz
6	Incremento de temperatura	ΔT, definida por K _j	Depende de la aplicación, lo define K _j , para ΔT= Δ25 °C es 433, para ΔT= Δ50 °C es 632	°C
7	Densidad de flujo	B _m	Depende de la aplicación	Tesla
8	Material del núcleo		Depende de la aplicación	
9	Forma geométrica		Depende de la aplicación	
10	Energía	E	$E = \frac{1}{2} LI^2$	Watt*s
11	Factor de llenado de la ventana	K _u	K _u = 0.4, para núcleos EE, EI, entre otros $A_p = \left(\frac{2E \cdot 10^4}{K_u K_j B_m} \right)^x$	
12	Producto áreas	A _p	el factor x depende de la forma geométrica, x= 9/8 = 1.125	cm ⁴

13	Selección de nucleó con producto de áreas mayor que el calculado		Tomar datos del núcleo	
14	Producto áreas de núcleo	A_p	Según tamaño de núcleo seleccionado	cm^4
15	Longitud de vuelta promedio	MLT	Dato del núcleo	cm
16	Área transversal	A_c	Dato del núcleo	cm^2
17	Área de ventana	A_w	Dato del núcleo	cm^2
18	Área disponible para embobinado	w_a	Dato del carrete donde se arrolla el alambre de cobre	cm^2
19	Área total	A_t	Dato del núcleo	cm^2
20	Peso del núcleo	W_{tfe}	Dato del núcleo	g
21	Densidad de corriente	J	$J = k_j A_p^y$, “y” exponente depende de forma geométrica	A/cm^2
22	Área del conductor desnudo	A_{wb}	$A_{wb} = \frac{I}{J}$	cm^2
23	Seleccionar tamaño de conductor tabla AWG		Tomar nota de área de conductor A_{wb}	AWG
24	Resistencia por unidad de longitud	R_l	Según conductor seleccionado	Ω/cm
25	Área efectiva de ventana	W_{aeff}	$W_{aeff} = (0.75)w_a$, es el área de ventana del carrete	cm^2

26	Numero de vuelta del secundario	N	$N = \frac{W_{aef}(Ku)}{A_{wb}}$	
27	Entrehierro	I_g	$lg = \frac{0.4\pi N^2 A_c = \pi r^2 * 10^{-08}}{L}$	cm
28	Flujo de dispersión	F	$F = 1 + \frac{I_g}{\sqrt{A_c}} \ln\left(\frac{2D}{L_g}\right)$, D es la altura media de la ventana Wa, se muestra en la figura 5.2	
29	Recalcular el número de vuelta	N_c	$N_c = \frac{N}{\sqrt{F}}$	
30	Resistencia del embobinado	R	$R = N_c (MLT) (R_t)$	Ω
31	Perdidas del cobre	P_{cu}	$P_{cu} = I^2 R$	Watts

Tabla 5.2 Procedimiento de diseño de inductores para altas frecuencias, propuesta del Ing. Roger Carrillo.

5.4 Diseño del inductor considerando su funcionamiento a altas frecuencias

Generando una hoja de Excel, se diseñó el inductor. La tabla 5.3 muestra los resultados

Diseño de elementos magnéticos en alta frecuencia		
1. Inductancia deseada		
L	0.0021	H
2. Corriente de operación		
I_o	0.7	A
3. Corriente de rizo		
ΔI	0.23225	A pico-pico
4. Corriente total		

I	0.93225	A
5. Frecuencia de operación		
f	45000	Hz
6. Factor de incremento de temperatura		
Kj para $\Delta 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	632	
7. Densidad de flujo		
Bm	0.3	Tesla
8. Material de núcleo		
MnZc	Manganeso Zinc	
9. Forma geométrica		
	26*20*6.2	EE
10. Energía		
	0.0009125	Watts*s
11. Factor de llenado de la ventana		
Ku	0.4	
12. Producto Áreas		
Ap	0.3459762	cm ⁴
13. Selección de núcleo con producto áreas mayor que el calculado		
EE1425	26*20*6.2	EE
14. Producto áreas de núcleo		
Ap	0.368025	cm ⁴
15. Longitud de vuelta promedio		
MLT	5.2	cm
16. Área transversal del núcleo		
Ac	0.390625	cm ²
17. Área de la ventana		
Aw	1.0038	cm ²
18. Área disponible para embobinado		
Wa	0.53	cm ²
19. Área total		
At		cm ²
20. Peso de núcleo		
Wtfe	14	g
21. Densidad de corriente		
J	721.66608	A/ cm ²
22. Área del conductor desnudo		
Awb	0.0012918	cm ²
23. Seleccionar calibre del alambre AWG		
AWG	26	AWG
24. Resistencia por unidad de longitud		

RI	0.001346	Ω/cm
25. Área efectiva de la ventana		
W _{aeff}	0.3975	cm^2
26. Número de vuelta del embobinado		
N	184.62576	Vueltas
27. Entrehierro		
l _g	0.0796774	Cm
28. Flujo de dispersión en el entrehierro		
F	1.3653995	
29. Recalcular vueltas del inductor debido al flujo de dispersión en el entrehierro		
N _c	158.00194	Vueltas
30. Resistencia del embobinado		
R	1.1058872	Ω
31. Pérdidas en el cobre del embobinado		
P _{cu}	0.9611156	Watts

Tabla 5.3 Cálculo del inductor del driver

En resumen: Número de vueltas: 158, Calibre: 26, Entrehierro: 0.0796774 cm, Núcleo: EE1425

5.5 Filtro EMI

El driver, al ser una fuente conmutada, genera ruido. Es necesario un filtro de entrada obligado por norma.

El diagrama esquemático modelo de un filtro de ruido EMI[vii] simple es el que se muestra en la figura, se compone de dos condensadores CY, un CMC (transformador en modo común) y un condensador CX.

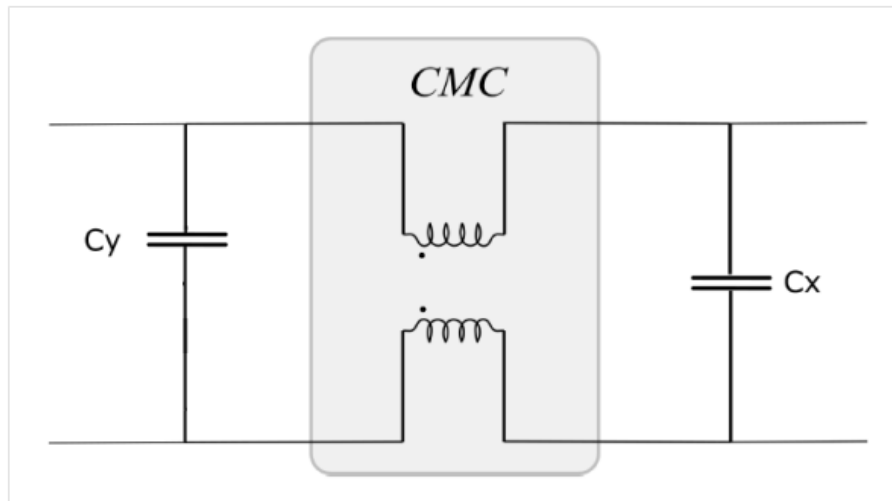


Figura 5.3 Esquema general de un filtro EMI

La estructura CMC consiste en dos devanados con el mismo número de espiras en torno a un núcleo toroide de alta permeabilidad magnética. Para representarlo se utilizan dos bobinas acopladas. Es decir, el punto en una bobina indica la orientación de la FEM inducida en esa bobina, que es proporcional a la derivada respecto al tiempo de la corriente que entra por el punto de la otra bobina.

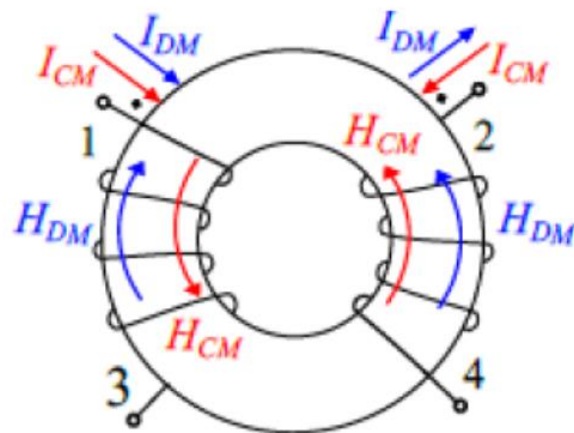


Figura 5.4 Filtro EMI de embobinados acoplados, I_{CM} Corriente de modo común, I_{DM} Corriente de modo diferencial

Esquema de transformador CMC representando el sentido de las corrientes y campos magnéticos que generan tanto en modo común como diferencial.

Para ilustrar el efecto de este acoplo magnético, se puede utilizar el modelo de bobinas acopladas, en el que el acoplo se representa como una fuente dependiente de voltaje en serie con las bobinas, cuyo valor en el dominio de la frecuencia es proporcional a la propia frecuencia ω , la intensidad de corriente que circula por las bobinas y la inductancia mutua M entre bobinas. Esta viene dada por la ecuación donde k es el factor de acoplo entre las bobinas. En el caso del núcleo toroide, $L_1 = L_2$.

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \text{ Ecuación 5.12}$$

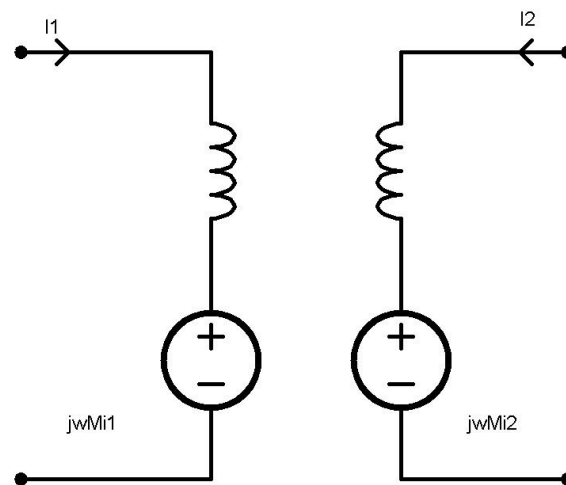


Figura 5.5 Diagrama esquemático del filtro EMI

Realizando un análisis de mallas las ecuaciones del modelo de bobinas acopladas serían las siguientes, tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia.

$$v_1 = L \frac{\delta i_1(t)}{\delta t} + M \frac{\delta i_2(t)}{\delta t} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

$$v_2 = L \frac{\delta i_2(t)}{\delta t} + M \frac{\delta i_1(t)}{\delta t} \quad \text{Ecuación 5.14}$$

$$V_1 = j\omega Li_1 + j\omega Mi_2 \quad \text{Ecuación 5.15}$$

$$V_2 = j\omega Li_2 + j\omega Mi_1 \quad \text{Ecuación 5.16}$$

Mediante estas expresiones, podemos obtener el valor de la inductancia equivalente del transformador tanto en modo común (I_{cm}) como en modo diferencial (H_{dm}). Es habitual descomponer las corrientes en los dos cables de alimentación o señal de un equipo en dos componentes: componente en modo común (ambas corrientes con el mismo sentido) y su componente en modo diferencial (corrientes con sentido contrario).

En el caso del modo común:

$$i_1 = i_2 = i_{cm} \quad \text{Ecuación 5.17}$$

$$V_1 = j\omega(L + M) i_{dm} \quad \text{Ecuación 5.18}$$

Y en el del modo diferencial:

$$i_1 = -i_2 = i_{dm} \quad \text{Ecuación 5.19}$$

$$V_1 = j\omega(L - M) i_{dm} \quad \text{Ecuación 5.20}$$

De las expresiones anteriores se desprende que la inductancia que un CMC presenta frente al modo común y al modo diferencial son respectivamente: $L_{cm}=L+M$ y $L_{dm}=L-M$.

El modelo esquemático no representa con precisión la respuesta a alta frecuencia del filtro EMI debido a la importancia que cobran a estas frecuencias los efectos parásitos de los diferentes componentes, así como los diferentes acoplamientos entre ellos.

La obtención de las expresiones de las inductancias en modo común y modo diferencial es esencial para poder realizar un estudio del comportamiento en altas frecuencias del filtro,

para poder estudiar en profundidad los diferentes efectos de los parásitos a diferentes frecuencias. Para nuestro caso agregamos resistencias al filtro, contemplando ajustar la respuesta del filtro con ellas y definiendo un transformador acoplado con inductancias de 1 mH, finalmente queda:

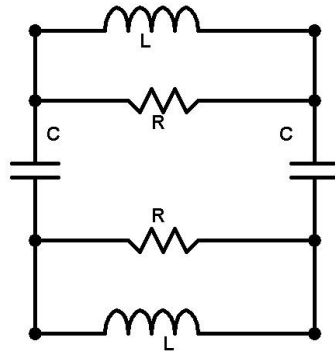


Figura 5.6 Filtro comercial con capacitores

5.6 Diseño de circuitos, Impreso para el integrado FL7701 y del driver completo

5.6.1 Circuito impreso:

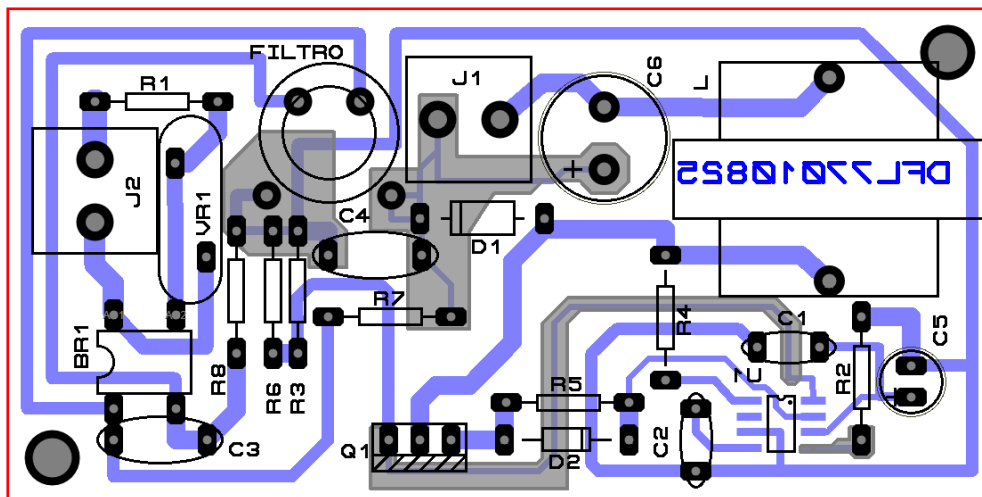


Figura 5.7 Tarjeta de circuito impreso de driver propuesto

5.6.2 Diagrama esquemático:

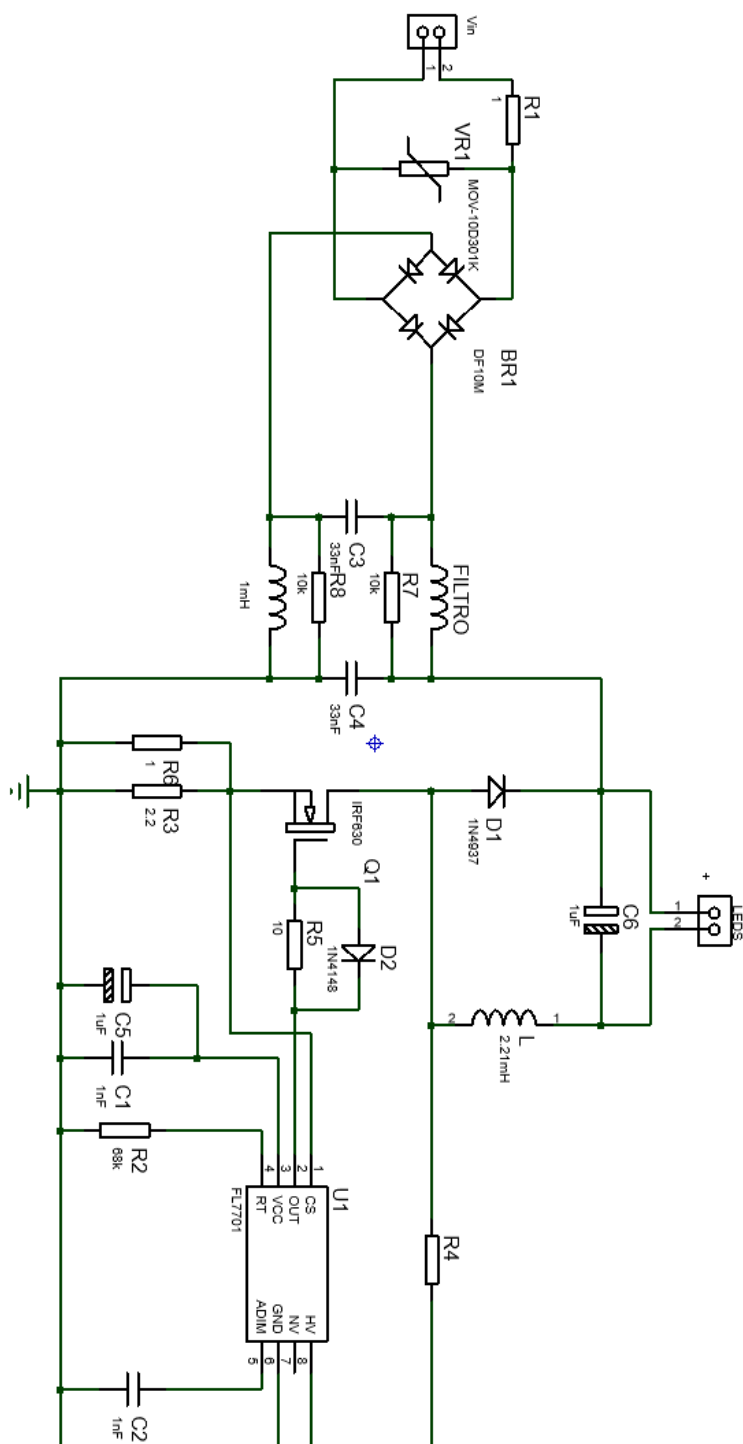


Figura 5.8 Diagrama esquemático de driver propuesto

5.6.3 Lista de materiales

Lista de componentes			
Total de partes			24
Categoría	Cantidad	Referencia	Valor
Capacitor	2	C1-C2	1nF
Capacitor	2	C3-C4	33nF
Capacitor	2	C5-C6	1 μ F
Resistencia	2	R1,R6	1
Resistencia	2	R2,R4	68k Ω
Resistencia	1	R3	2.2
Resistencia	1	R5	10
Resistencia	2	R7-R8	10k Ω
Driver	1	U1	FL7701
Transistor	1	Q1	IRF630
Diodo	1	D1	1N4937
Diodo	1	D2	1N4148
Puente rectificador	1	BR1	DF10M
Inductor filtro	1	FILTRO	1mH
Conectores	2	J1-J2	TBLOCK-I2
Inductor de potencia	1	L	2.21mH
Varistor	1	VR1	MOV-10D301K

Tabla 5.4 Lista de materiales

5.6.4 Luminario, partes constitutivas: Perfil de aluminio, Regleta de LEDS, Driver, Soporte de montaje.

Para la aplicación de la fuente conmutada desarrollada, implementó un luminario tipo perfil. Se utilizó una extrusión de aluminio para disipar el calor de la regleta de LEDS. Se aplicó el driver a una regleta de leds de la marca Samsung Electronics de 24V y 1A. Se diseñaron 2 piezas en plástico e impresas en 3D. Las figuras siguientes muestran las partes.



Figura 5.9 Perfil de aluminio, montaje de regleta y dissipador del calor.

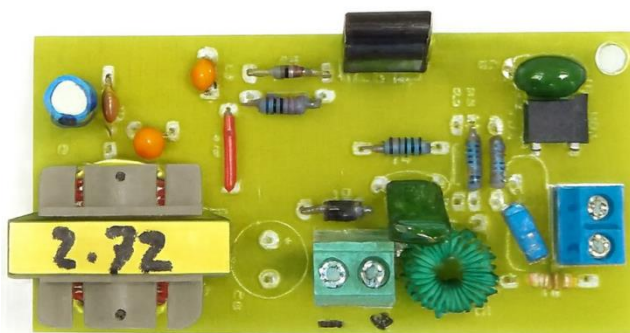
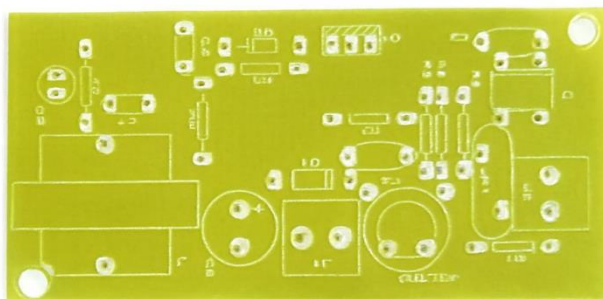


Figura 5.10 Driver de voltaje universal, 90 a 277 Vac, salida 24V 1A.

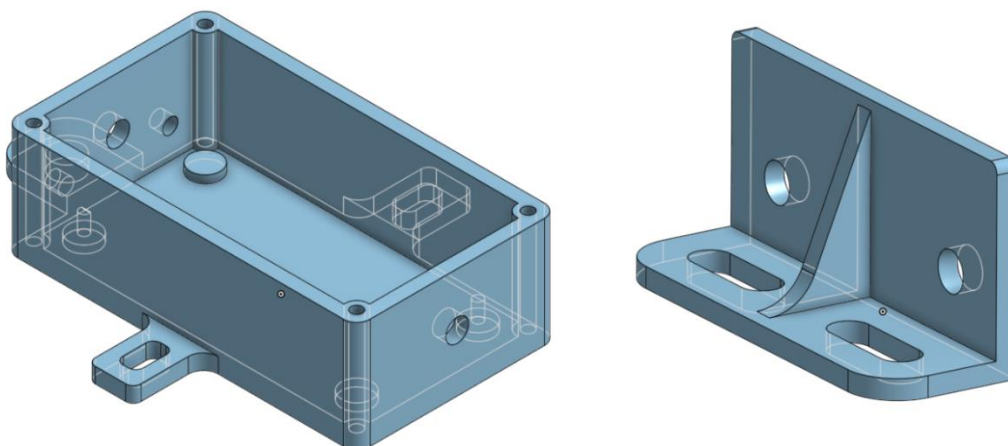


Figura 5.11 Porta_driver y tapa frontal del luminario.



Figura 5.12 Regleta de LEDS Samsung 24V 1A.



Figura 5.12 Luminario final, ensamble completo.

5.7 Pruebas y resultados

El diagrama a bloques de la figura 5.9 conceptualiza las pruebas de funcionamiento eléctrico de la fuente conmutada propuesta. Se miden de entrada el voltaje, la corriente, el factor de potencia, la potencia de entrada; la distorsión de armónicos no se tiene instrumento para su medición. De salida se mide el voltaje, corriente y potencia en LEDS.

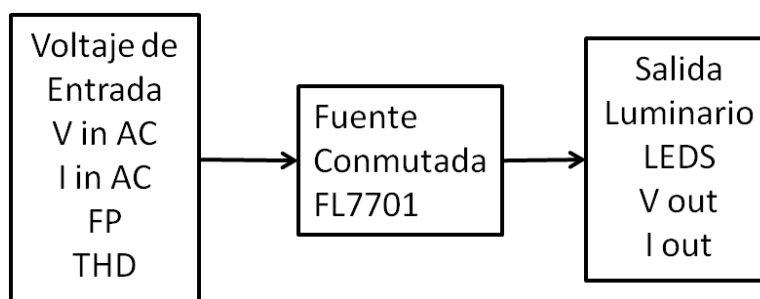


Figura 5.13 Diagrama base de pruebas y mediciones de la fuente conmutada propuesta

Se verifican también condiciones de operación de componentes críticos del sistema; temperaturas de MOSFET, Diodo del Buck, Inductor y FL7701. En el MOSFET y diodo se verifican sus tiempos de encendido apagado. Las primeras pruebas se realizaron en protoboard a continuación, algunos resultados.

La figura 5.14 muestra el encendido inteligente que realiza el controlador, en los primeros 3 semiciclos el sistema detecta los cruces por cero de la línea eléctrica y define el arranque en funcionamiento con AC. El canal amarillo muestra el voltaje de DRAIN del MOSFET, el canal azul la fuente VCC del FL7701

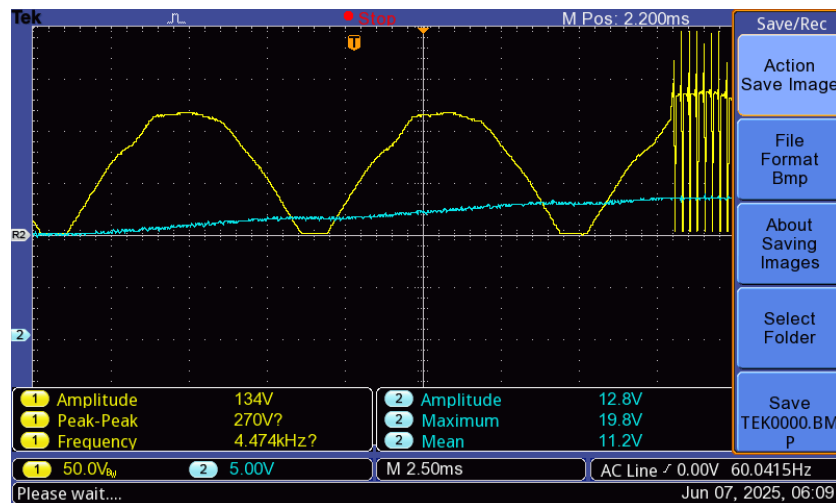


Figura 5.14 Procedimiento de encendido a 90 V de línea eléctrica

La figura 5.15 muestra el sistema o driver operando a 90 Vac de línea, se ve el voltaje de DRAIN del MOSFET y la fuente VCC del FL7701 ya estable.

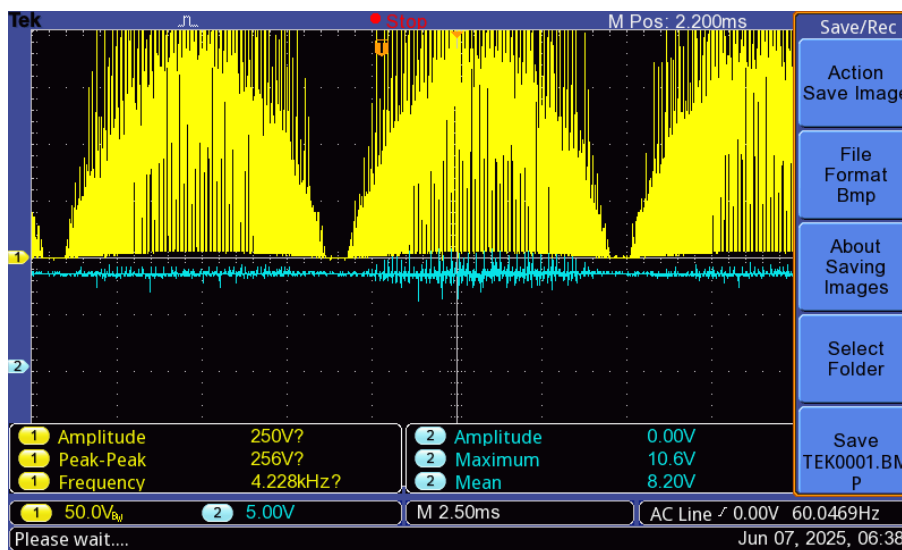


Figura 5.15 Funcionamiento estable a 90 Vac de línea.

La siguiente imagen muestra VCC del integrado del canal 2 del osciloscopio es la línea azul. Muestra las condiciones de estabilidad de VAC=117Vac. Prueba con el inductor del convertidor de 4 mH. Condiciones de estabilidad Vac = 113.

Diseñado el circuito impreso mostrado en la figura 5.7, se hizo un prototipo del mismo y las pruebas siguientes se hicieron en ese prototipo., la figura 5.16 muestra el prototipo.



Figura 5.16 Prototipo inicial de PCB del driver propuesto

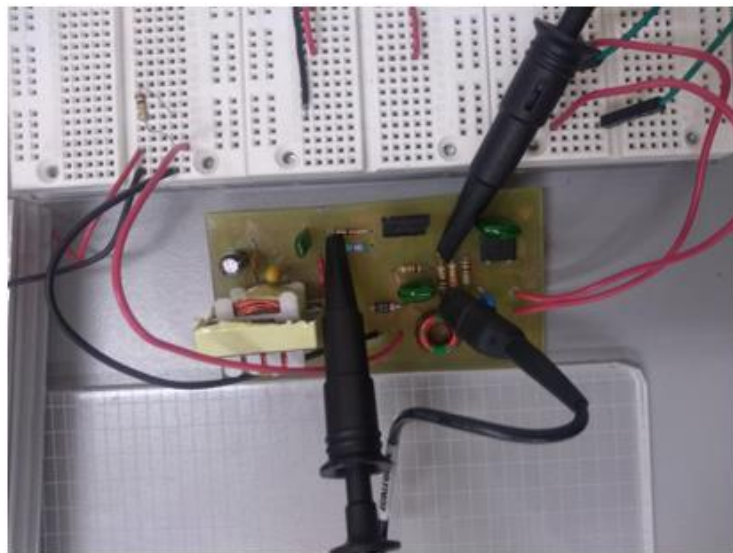


Figura 5.17 Conexiones para pruebas

En condiciones de 90 Vac de entrada, en la figura 5.18 se muestra la corriente en el SOURCE del MOSFET y en la figura 5.19 se muestra el control que realiza el FL7701 durante un semiciclo, se observa la variación inteligente del PWM para control de salida y conserva un factor de potencia alto en la entrada.

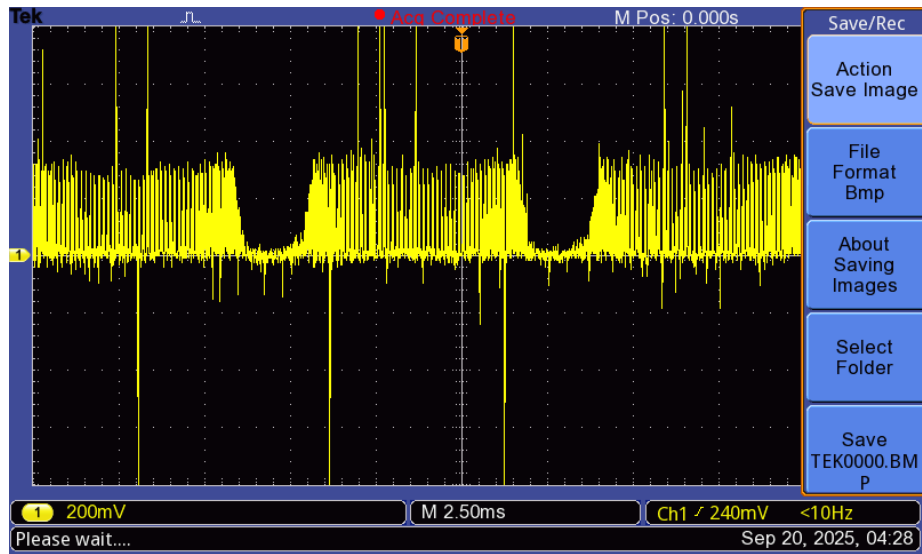


Figura 5.18 Corriente en el SOURCE del MOSFET a 90 Vac de entrada

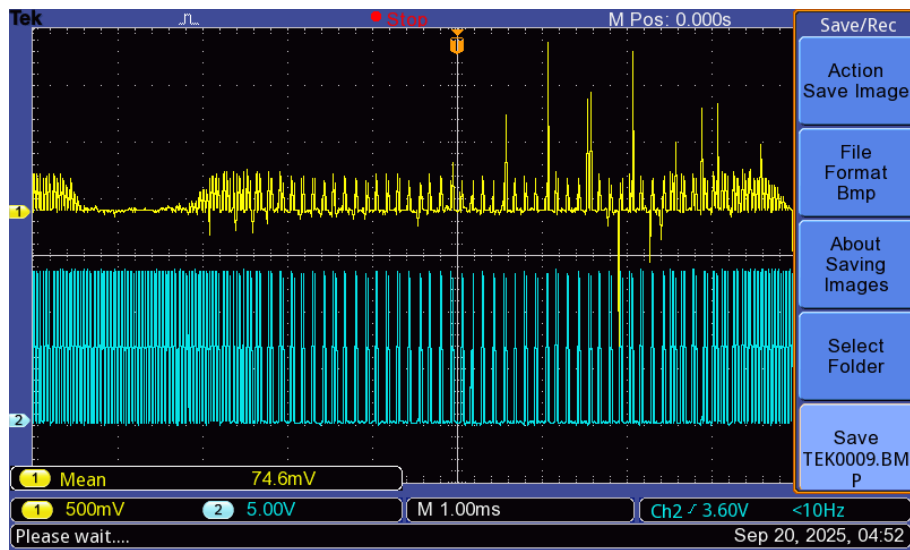


Figura 5.19 Control de disparos PWM en el GATE del MOSFET y la respectiva corriente de SOURCE.

En la figura 5.20 se muestra el voltaje de salida del convertidor, el voltaje en LEDS, en condiciones de 90 Vac de entrada.

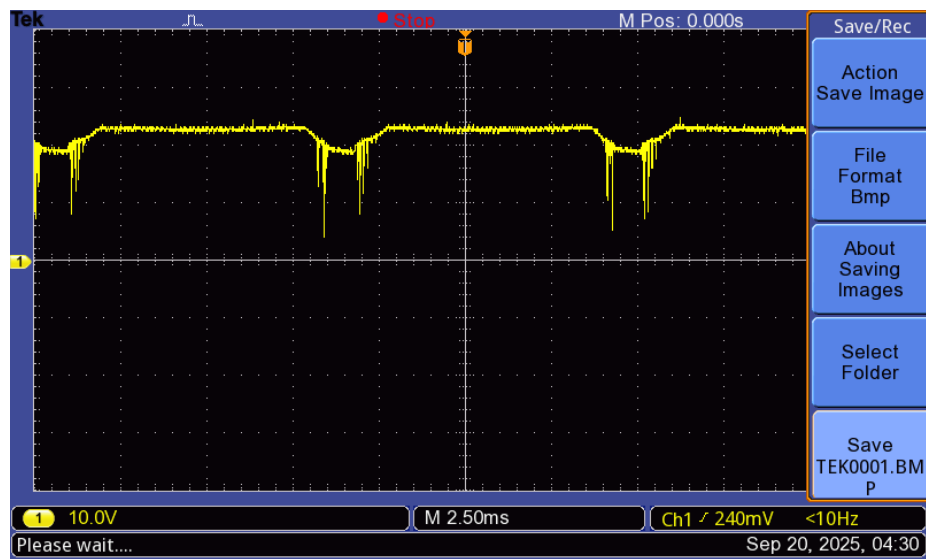


Figura 5.20 Voltaje salida en LEDS a 90 Vac de entrada

Con el analizador de redes AR5-L se midieron las condiciones de entrada del convertidor a 90 Vac, la figura 5.21 muestra las lecturas de entrada al convertidor.

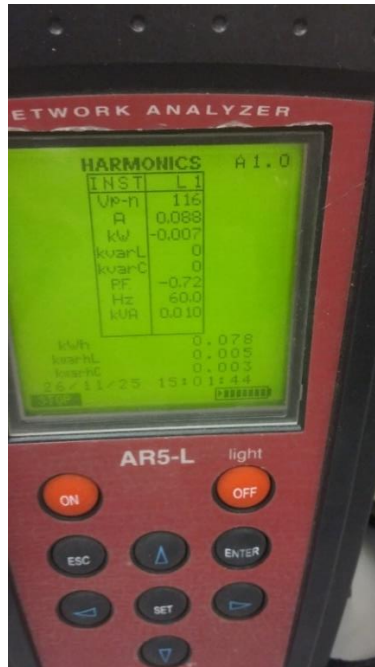


Figura 5.21 Lecturas de condiciones de entrada del convertidor a 90 Vac de entrada

En la figura 5.22 se muestra, a voltaje de entrada de 90 Vac, la corriente de salida del convertidor, corriente en LEDS.

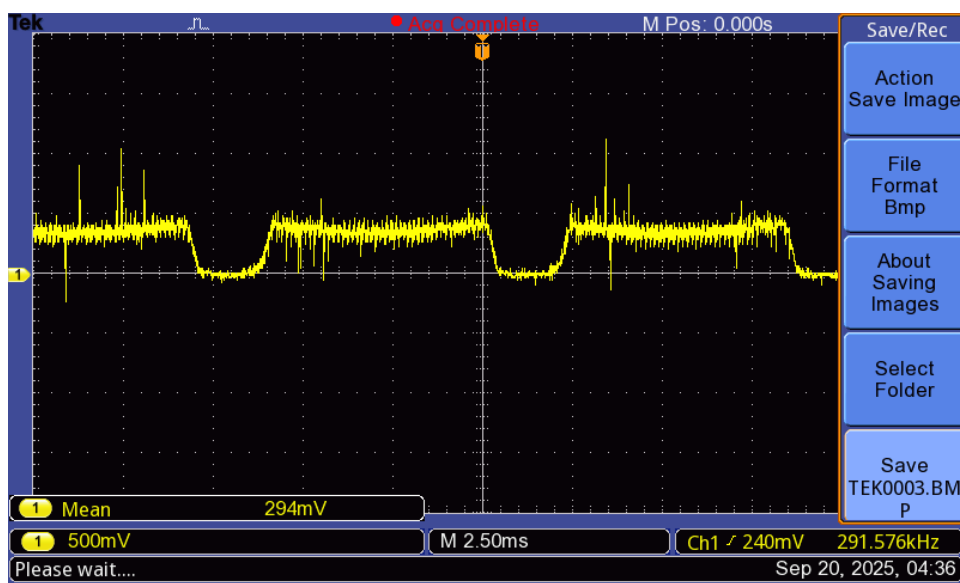


Figura 5.22 Corriente de los LEDS a 90V de línea.

Las condiciones de entrada del convertidor a 120 Vac se muestran en la figura 5.23.

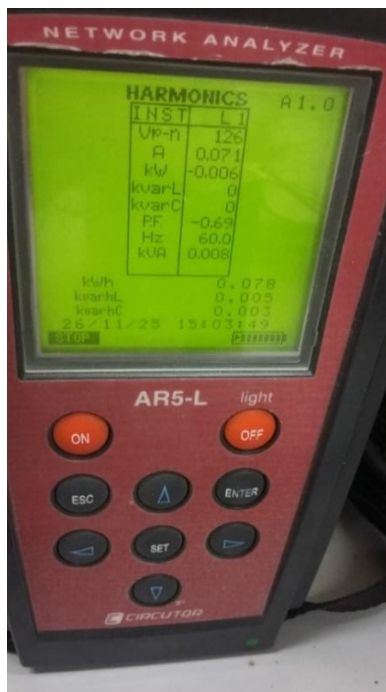


Figura 5.23 Mediciones de las condiciones de entrada a 120Vac

A Voltaje de entrada de 120Vac. En la figura 5.24 se muestra la corriente de salida del convertidor, corriente en LEDS.

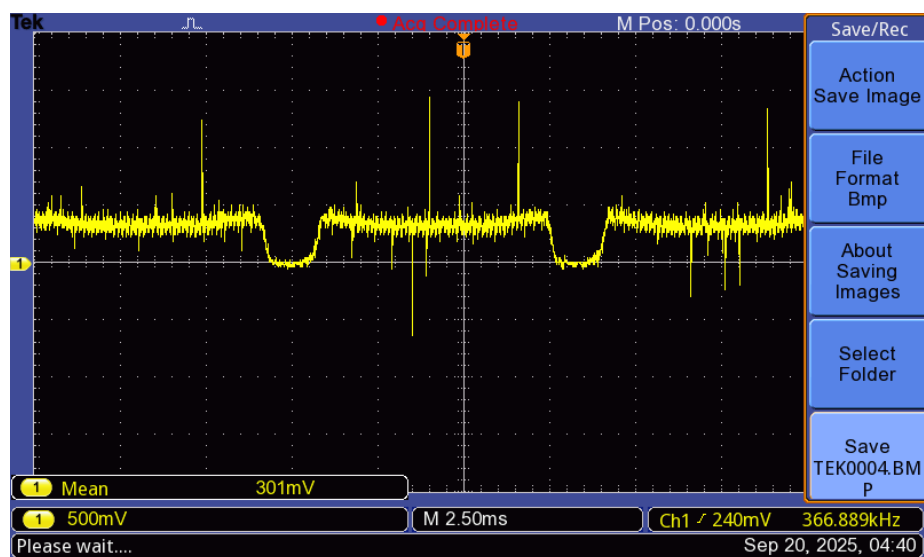


Figura 5.24 Corriente de salida del convertidor propuesto.

Cuando las condiciones de entrada no se cumplen para el funcionamiento del driver el FL7701 detiene el encendido y lo reinicia cada 300 ms, en la figura 5.25 se muestra este protocolo de protección, se observan los pulsos de inicio en el GATE del MOSFET.

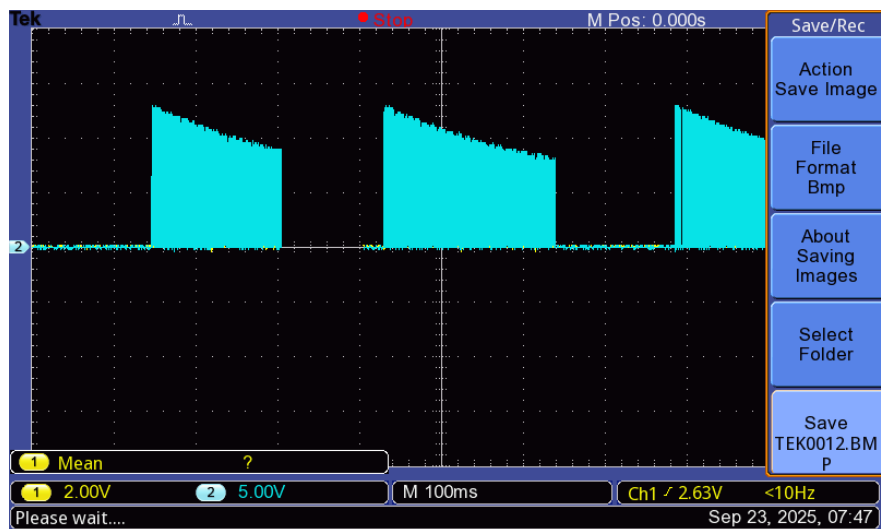


Figura 5.25 Protocolo de protección para reinicio al no cumplirse condiciones de operación

La figura 5.26 muestra la señal PWM de disparo del Mosfet del convertidor.

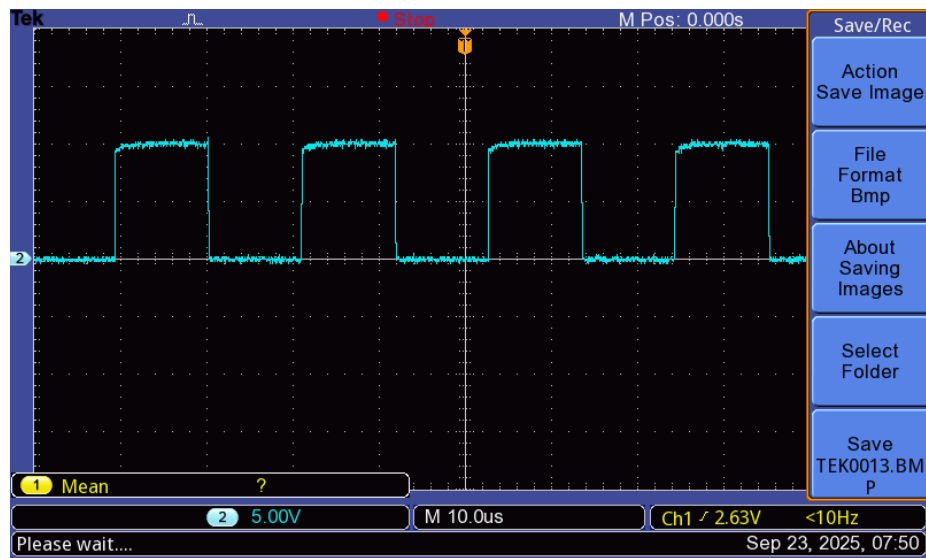


Figura 5.26 Disparo del MOSFET

La figura 5.27 muestra dos semiciclos de línea en su concepto de modulación PWM inteligente para regular salida y conservar alto factor de potencia. Se observan los disparos GATE en el MOSFET y corriente en el MOSFET.

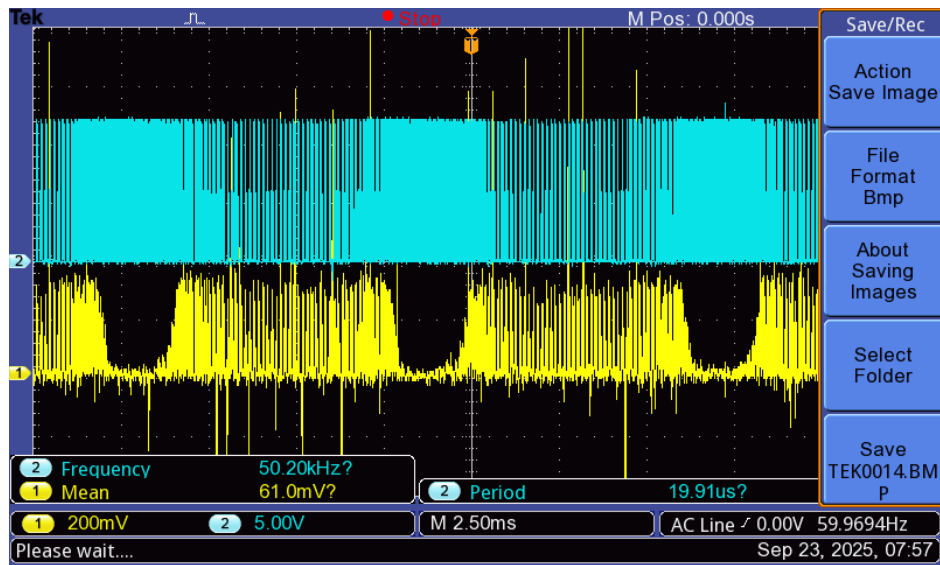


Figura 5.27 Control inteligente del driver propuesto

Finalmente, en estas pruebas se realizaron mediciones de la salida considerando un capacitor en paralelo a los LEDS. Las figuras 5.28 y 5.29 muestran estos resultados.

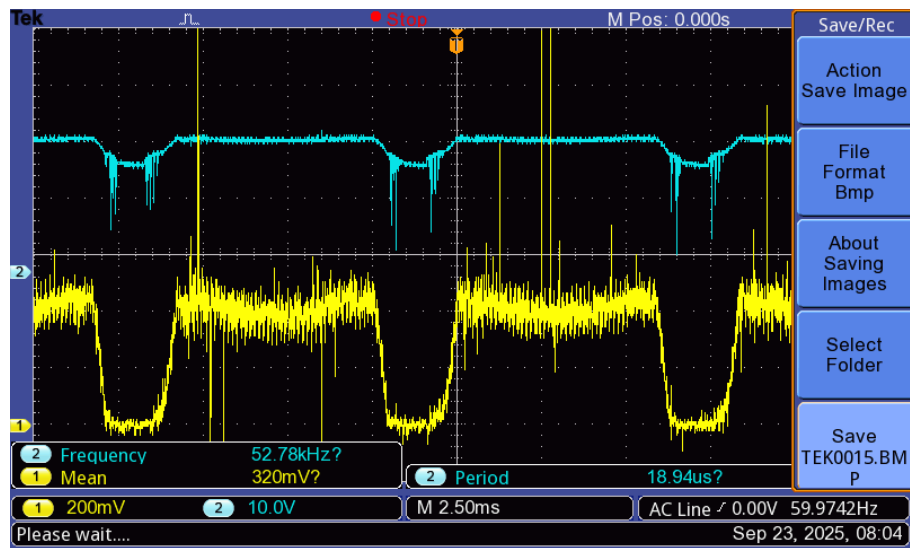


Figura 5.28, Voltaje y corriente de salida, LEDS, sin capacitor en paralelo

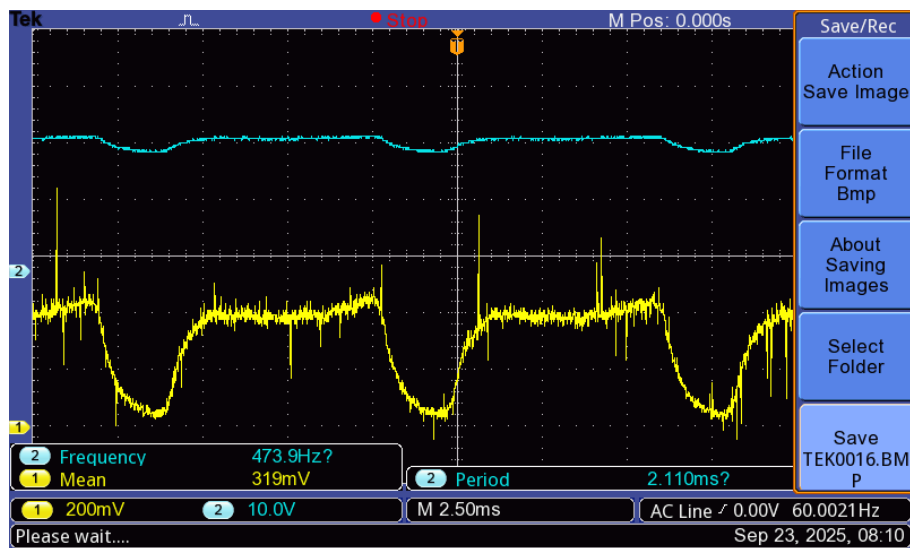


Figura 5.29 Voltaje y corriente de salida, en LEDS, con un capacitor en paralelo con los LEDS de 10 μ F.

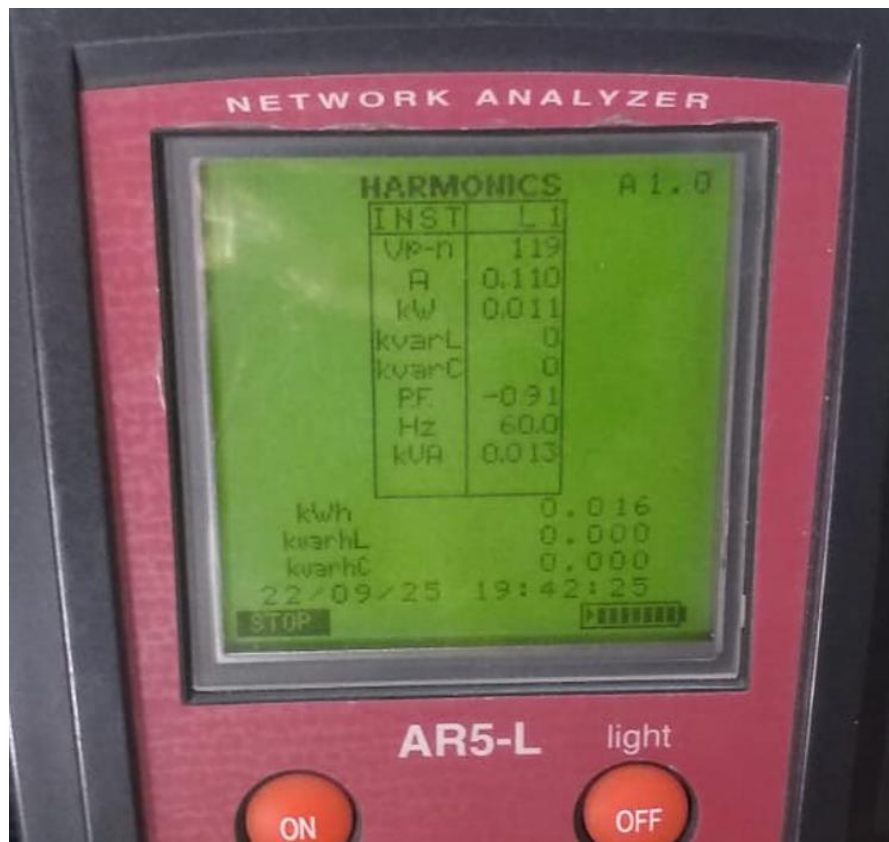


Figura 5.26 Condiciones de entrada a 127 Vac

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

El desarrollo en semiconductores 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 toda la investigación y el apoyo mencionado se logró cumplir el objetivo general, es decir:

Diseñar e implementar la fuente de potencia controlada por corriente para iluminación con LEDS propuesta, cumpliendo el manejo correcto de los LEDS. La fuente propuesta cumple plenamente las funciones de transformar la corriente y adaptar la salida a los LEDS y sus especificaciones.

El desarrollo requirió una correcta selección de drivers para asegurar que las características eléctricas de los LEDS se mantuvieran dentro de parámetros seguros.

El correcto diseño de la fuente evitó la necesidad de disipadores o sistemas de refrigeración tanto en el dispositivo de potencia como el circuito integrado, es decir, la aplicación está dentro de las especificaciones de uso del FL7701 y el diseño del circuito impreso también es correcto para evitar ruido y ayudar al integrado y Mosfet a disipar el calor.

El controlador (fuente propuesta) satisface la normatividad para estos dispositivos. El driver cumple la norma de corregir el factor de potencia sin necesitar componentes externos complejos y no excede los límites de distorsión de armónicos.

Se diseñó un luminario para mostrar una aplicación real de la fuente propuesta.

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.

Concluyo que se cumplieron los objetivos del plan propuesto como tema de tesis, tanto el objetivo general como los particulares.

Como propuesta de producto se requiere hacer un estudio de factibilidad, que implique costos, elementos no contemplados en este proyecto, como gabinete y luminario, además de un estudio de mercado, entre otros.

De gran satisfacción y manera personal este trabajo recepcional me mostró que con dedicación se logra el conocimiento de sistemas complejos, como lo es el propio circuito integrado, que incluye elementos tanto analógicos como digitales. Ver la integración de bloques como detectores de cruce por cero de una señal, el convertidor Sigma/Delta para

generar la referencia sinodal del control, temporizadores, osciladores, amplificadores operacionales que funcionan como comparadores. Puedo concluir que el integrado siendo aparentemente simple contiene fundamentos de electrónica que me enseñaron en la universidad.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Definición de flujo luminoso (Φ_v Lumen) e intensidad luminosa (I_v Candela).	11
Figura 1.2 Definición de Iluminancia, un ejemplo.	12
Figura 2.1 Partes integrantes del LED emisor de luz blanca.....	16
Figura 2.2 Esquema interno del RGB y de lado derecho Luz blanca producida por los colores rojo, verde y azul.....	18
Figura 2.3 Bandas de energía de los semiconductores.	19
Figura 2.4 Niveles energéticos de los materiales semiconductores para LEDS.....	21
Figura 2.5 La integralidad entre LED emisor de luz y su encapsulado.....	23
Figura 2.6 Ejemplo de estructura de semiconductores de un diodo emisor para luz blanca.	25
Figura 2.7 Eficiencia luminosa de las tecnologías de luz artificial, histórico.	26
Figura 2.8 Diagrama de cromaticidad CIE, conceptos generales.	30
Figura 2.9 Diagrama de cromaticidad CIE con los colores percibidos por el ojo humano. diagrama de cromaticidad y base del sistema CIE.	31
Figura 2.10 Luz acromática $x=1/3$, $y=1/3$	31
Figura 2.11 Regiones en el diagrama de cromaticidad asociadas a colores comunes.....	32
Figura 2.12 La emisión de luz LED y su transformación a otros colores	34
Figura 3.1 Esquemático del diodo	39
Figura 3.2 circuito de aplicación de un diodo rectificador	40
Figura 3.3 Señales de Voltaje, corriente de la figura 3.2 y la curva de operación del diodo	41
Figura 3.4 Modelado del diodo LED CREE serie 3030	43
Figura 3.5 Modelado del diodo LED Bridgelux COB	45

Figura 4.1 Diagrama de bloques de una fuente conmutada.....	48
Figura 4.2 Diagrama a bloques del circuito de control de una fuente conmutada	49
Figura 4.3 Diagrama de señales de control en una fuente conmutada	49
Figura 4.4 Esquemático general de un convertidor Buck.....	52
Figura 4.5 Estados básicos de operación de un convertidor Buck	54
Figure 4.6 Esquemático general de un convertidor boost	55
Figure 4.7 Estados “ON” “OFF” del convertidor Boost	57
Figure 4.8 Esquemático general del convertidor Buck-Boost.....	58
Figure 4.9 Convertidor Buck Boost no inversor de polaridad.....	59
Figure 4.10 Estados “ON” “OFF” del convertidor Buck Boost	60
Figura 4.11 diagrama de bloques del LNK603-606/613-616.....	71
Figura 4.12 Aplicación típica LNK603-606/613-616	72
Figura 4.13 Diagrama de bloques.....	74
Figura 4.14 Aplicación Típica.....	74
Figura 4.15 Aplicación típica del driver FL7701	79
Figura 4.16 Diagrama general de bloques internos del driver FL7701	79
Figura 4.17 Disposición de terminales del FL7701.....	80
Figura 4.18 Secuencia de arranque o encendido del FL7701.....	85
Figura 4.19 Generación de la referencia interna de la señal seno de entrada al CI, con un modulador sigma /delta.	86
Figura 4.20 Modulador sigma/delta ejemplo.....	86
Figura 4.21 Opción para disminuir potencia de pérdida por polarización del FL7701 en líneas de alto voltaje.	87
Figura 4.22 Atenuación por divisor resistivo en terminal ADIM.....	87
Figura 4.23 Corriente de los LEDS de acuerdo al modo de operación del convertidor.	89
Figura 4.24 Características típicas de funcionamiento del driver.	90

Figura 4.25 Sin capacitor en cadena de LEDS.	91
Figura 4.26 Con capacitor en LEDS.....	91
Figura 5.1 Hoja de cálculo proporcionada por ONSEMI.....	96
Figura 5.2 EE1425.....	97
Figura 5.3 Esquema general de un filtro EMI	104
Figura 5.4 Filtro EMI de embobinados acoplados, ICM Corriente de modo común, IDM Corriente de modo diferencial	104
Figura 5.5 Diagrama esquemático del filtro EMI.....	105
Figura 5.6 Filtro comercial con capacitores	107
Figura 5.7 Tarjeta de circuito impreso de driver propuesto	107
Figura 5.8 Diagrama esquemático de driver propuesto.....	108
Figura 5.9 Perfil de aluminio, montaje de regleta y disipador del calor.....	110
Figura 5.10 Driver de voltaje universal, 90 a 277 Vac, salida 24V 1A.....	110
Figura 5.11 Porta_driver y tapa frontal del luminario.....	111
Figura 5.12 Regleta de LEDS Samsung 24V 1A.	111
Figura 5.12 Luminario final, ensamble completo.....	111
Figura 5.13 Diagrama base de pruebas y mediciones de la fuente conmutada propuesta..	112
Figura 5.14 Procedimiento de encendido a 90 V de línea eléctrica	113
Figura 5.15 Funcionamiento estable a 90 Vac de línea.....	113
Figura 5.16 Prototipo inicial de PCB del driver propuesto	114
Figura 5.17 Conexiones para pruebas.....	114
Figura 5.18 Corriente en el SOURCE del MOSFET a 90 Vac de entrada.....	115
Figura 5.19 Control de disparos PWM en el GATE del MOSFET y la respectiva corriente de SOURCE.....	115
Figura 5.20 Voltaje salida en LEDS a 90 Vac de entrada	116
Figura 5.21 Lecturas de condiciones de entrada del convertidor a 90 Vac de entrada	116

Figura 5.22 Corriente de los LEDS a 90V de línea.	117
Figura 5.23 Mediciones de las condiciones de entrada a 120Vac	117
Figura 5.24 Corriente de salida del convertidor propuesto.	118
Figura 5.25 Protocolo de protección para reinicio al no cumplirse condiciones de operación	118
Figura 5.26 Disparo del MOSFET	119
Figura 5.27 Control inteligente del driver propuesto	119
Figura 5.28, Voltaje y corriente de salida, LEDS, sin capacitor en paralelo.....	120
Figura 5.29 Voltaje y corriente de salida, en LEDS, con un capacitor en paralelo con los LEDS de 10 μ F.....	120
Figura 5.26 Condiciones de entrada a 127 Vac	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Emisores de diferentes colores de luz para LEDS.....	24
Tabla 2.2 Índice de reproducción cromática de las tecnologías para producir luz blanca con LEDS.	33
Tabla 4.1 Funcionamiento de terminales del FL7701	80
Tabla 4.2 Especificaciones de funcionamiento máximas del FL7701	81
Tabla 4.3 Especificaciones de polarización recomendadas para el FL7701	81
Tabla 4.4 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701	82
Tabla 4.5 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701	82
Tabla 4.6 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701	82
Tabla 4.7 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701	83
Tabla 4.8 Especificaciones de funcionamiento recomendadas para el FL7701	83
Tabla 5.1 Especificaciones de la propuesta.	94

Tabla 5.2 Procedimiento de diseño de inductores para altas frecuencias, propuesta del Ing. Roger Carrillo.	101
Tabla 5.3 Cálculo del inductor del driver	103
Tabla 5.4 Lista de materiales	109

BIBLIOGRAFÍA

[i] Enciclopedia Concepto, Editorial Etecé

[ii] Introduction to Light Emitting Diodes. Kenneth R. Spring - Scientific Consultant, Lusby, Maryland

[iii] Reinhart, C. (2014): Daylighting handbook 1. Fundamentals of designing with the Sun. Building Technology Press.

[iv] Colonel T. Mclyman Transformer and Inductor Design Handbook, Third Edition

[v] Fundamentals of Power Electronics, SECOND EDITION, Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic University of Colorado Boulder, Colorado

[vi] CENIDET, DISEÑO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS EN ALTA FRECUENCIA. TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA. CUERNAVACA. MORELOS, MÉXICO DICIEMBRE 2004.

[vii] EMI FILTER DESIGN THIRD EDITION RICHARD LEE OZENBAUGH
TIMOTHY M. PULLEN