

**Estudio del estado del arte de las lámparas de iluminación
LED y su comportamiento armónico.**

MEMORIA

Autor: Roberto Rivera Sierra

Director: Luis Sainz Sopera

Convocatoria: Extraordinaria 06/2014



**Màster Interuniversitari UB-UPC
d'Enginyeria en Energia**

Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia

Sol·licitud d'acceptació de presentació del Treball Final de Màster i sol·licitud de defensa pública.

Alumne: Roberto Rivera Sierra

DNI: 72538439G

Títol: Estudio del estado del arte de las lámparas de iluminación LED y su
comportamiento armónico

Director: Luis Sainz Sopera

Acceptació de la presentació del Treball:

Confirmo l'acceptació de la presentació del Treball Final de Màster.

Per a que consti,

Cognoms, nom (director del Treball)

Sol·licito:

La defensa pública del meu Treball Final de Màster.

Per a que consti,

Cognoms, nom (Alumne)

Barcelona,..... de..... de.....

Agradecimientos

Este trabajo de final de master se ha podido desarrollar gracias al apoyo de mi familia y amigos. Madre Irma Sierra. Padre Eugenio R. Pareja Iera V; Amigos José A. David L. Mikel A. Saioa. B. I. Elizalde.

Gracias al tutor Luis Sainz quien ha compartido sus conocimientos y guiado el desarrollo de este trabajo.

Compañeros de estudio con quienes he podido trabajar a lo largo del master. Yolanda G. Yolanda R. Alejandro A. Rubén S.

Y sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica de Catalunya y a la Universidad de Barcelona por los servicios de enseñanza prestados y la oportunidad de estar aquí.

Resumen

Este trabajo de final de master ha estudiado el estado del arte de los sistemas de iluminación LED así como las diferentes topologías de los circuitos electrónicos que alimentan la cadena de LEDs de las lámparas con el objeto de conocer las corrientes consumidas por dichas lámparas, poder determinar su emisión de armónicos y analizar posteriormente su impacto en la red eléctrica.

Agradecimientos.....	3
Resumen	4
Índice	5
Capítulo I.....	7
1. Introducción	7
1.1. Motivación.....	7
1.2. Objetivos	8
1.3. Esquema del trabajo	8
Capítulo II.....	10
2. Fuentes de iluminación	10
2.1. Incandescencia	12
2.1.1. Lámparas incandescentes estándar	12
2.1.2. Lámparas incandescentes con halógenos.....	13
2.2. Lámparas de luminiscencia	14
2.2.1. Fotoluminiscencia	14
2.2.1.1. Fluorescente lineal.....	15
2.2.1.2. Descarga de alta intensidad.....	16
2.2.1.3. Vapor de sodio a baja presión	17
2.2.1.4. Gas a baja presión por inducción.....	18
2.2.1.5. Vapor de sodio de alta presión	19
2.2.1.6. Vapor de mercurio a alta presión	20
2.2.1.7. Vapor de mercurio con halogenuros metálicos.....	22
2.2.1.8. Fluorescentes compactas o de bajo consumo	23
2.2.1.9. Equipos auxiliares de las lámparas de descarga	25
2.2.2. Electroluminiscencia.	29
2.2.2.1. Lámparas de estado sólido de diodos emisores de luz.....	29
Capítulo III.....	32
3. Circuito equivalente lámparas LED y forma de onda de la corriente consumida... 32	
3.1. Circuitos de alimentación de las lámparas LED.....	33
3.1.1. Circuitos electrónicos de lámparas LED no regulables.....	35
3.1.1.1. Circuitos electrónicos básicos	36
3.1.1.2. Circuitos electrónicos con factor de potencia mejorado	45
3.1.2. Circuitos electrónicos de lámparas LED con regulación-dimming	51
3.1.2.1. Circuito externo de regulación por control de fase AC.....	51
3.1.2.2. Analógico (0-10V).....	54
3.1.2.3. Control Lógico	55
3.2. Forma de onda de la corriente consumida	56

3.2.1. Circuito electrónico básico con configuración estándar y sin aislamiento galvánico	59
3.2.2. Circuito electrónico con mejora del factor de potencia y sin aislamiento galvánico.....	62
3.2.2.1. Convertidor buck con filtro inductivo en el lado AC	62
3.2.2.2. Convertidor buck con filtro inductivo en el lado DC	64
3.2.2.3. Convertidor buck con filtro LCD en el lado DC.....	66
3.2.2.4. Convertidor buck con filtro valley fill	68
3.2.2.5. Convertidor buck con filtro valley fill mejorado	70
3.2.3. Resumen de los resultados obtenidos en las simulaciones	72
Capítulo IV	74
4. Conclusiones.....	74
4.1. Resultados y conclusiones.....	74
4.2. Balance de objetivos	76
4.3. Mejoras y trabajos futuros.....	76
Bibliografía.....	77

1. Introducción

1.1. Motivación

Desde la creación de la primera bombilla por Thomas Alba Edison hasta nuestros días, la iluminación ha evolucionado a pasos agigantados para atender las necesidades en distintos lugares y condiciones. Esta evolución ha ido de la mano para su desarrollo de los avances en materiales y tecnologías. Primero apareció la bombilla que emitía luz a través del calentamiento de un filamento; luego aparecieron las bombillas de descarga en gas, que generan radiación en el espectro visible usando un arco controlado en un medio gaseoso ya sea de mercurio, sodio o halógenos metálicos; posteriormente, surgen las bombillas de inducción, que a través de una corriente inducida excitan los átomos de mercurio del interior de la bombilla, generando radiación que se transforma en radiación en el espectro visible usando fósforo amarillo; y actualmente, con el desarrollo de los semiconductores para aplicaciones de iluminación general, los diodos emisores de luz (LED).

Los países desarrollados ven la necesidad de cuidar y preservar el medio ambiente y se está incentivando el uso de sistemas de iluminación de mayor eficiencia. Así como los gobiernos están implantando la prohibición del uso de bombillas de baja eficiencia como las incandescentes y se recomienda el uso de lámparas fluorescentes compactas y diodos emisores de luz que brindan mejores prestaciones y eficiencia. Es un hecho que en España esto da lugar a legislaciones que regulan la implantación y uso de estos equipos de forma que se brinde una garantía de la calidad en los equipos de iluminación. No obstante, junto a los beneficios que comporta la sustitución de las lámparas de incandescencia por otras de mucha mayor eficiencia como los fluorescentes compactos y las lámparas LED aparecen una serie de problemas colaterales en el campo de la calidad del suministro eléctrico que deben ser analizados para intentar reducirlos en la medida de lo posible. En concreto, las lámparas de eficiencia energética son, en general, unas cargas no lineales que consumen unas corrientes altamente distorsionadas. Así, aunque la emisión de armónicos en la red de una única lámpara es muy reducida debido a su bajo consumo, el conjunto de estas lámparas conectadas en un punto de la red puede llegar a constituir una carga agregada que puede provocar una contaminación armónica elevada de las tensiones y corrientes del sistema.

Este estudio sirve como punto de partida para determinar e identificar como se caracteriza el uso de lámparas LED en los sistemas de iluminación e iniciar el análisis y caracterización de su emisión de armónicos en la red. Lo anterior conlleva a conocer las ventajas y desventajas que trae consigo esta tecnología, y de esta forma disponer del conocimiento necesario de acuerdo a las características de estos equipos. Esto implica el carácter técnico del efecto de la utilización de LEDs en la calidad de la red de potencia eléctrica, de manera que un análisis centrado en este aspecto permita reconocer los efectos nocivos que se pueden generar en la distorsión de tensiones y corrientes al instalar esta tecnología de forma masiva.

Existen países con interés en el desarrollo de este tipo de tecnologías, un ejemplo de ello es el Departamento de Energía de los Estados Unidos que ha puesto en marcha programas de evaluación como el CALiPER (Commercially Available LED Product Evaluation and

Reporting) para estudiar las características lumínicas y eléctricas de los equipos LED comerciales disponibles en el mercado pero que deja de lado los aspectos de calidad e impacto de estos. Es tipo de iniciativa por parte de organizaciones gubernamentales dejan en evidencia el interés creciente en los sistema LED de iluminación. No obstante existe poco material relacionado de forma directa con un análisis detallado del comportamiento de los equipos de iluminación LED en el campo de los armónicos, sobre todo para aplicaciones a nivel particular, dado que es una tecnología de futuro que se está promoviendo de forma masiva gracias a sus prestaciones. Debido a esto, el presente estudio pretende ser un análisis del estado del arte del problema así como un primer paso en la caracterización armónica de este tipo de dispositivos (se ha podido constatar que todavía no existen modelos analíticos que permitan caracterizar su emisión de armónicos en la literatura ni ser incorporados a programas de estudio de flujo armónico de cargas).

1.2. Objetivos

En este contexto, este trabajo de final de master pretende determinar el comportamiento de las lámparas de iluminación LED y su comportamiento armónico y para conseguir este objetivo se han analizado los siguientes puntos:

- Estudio de las distintas fuente emisoras de luz.
- Análisis de los circuitos de alimentación de las lámparas LED.
- Programación de los circuitos más representativos de las lámparas.
- Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones de los circuitos.
- Elaboración de conclusiones relativas a los resultados obtenidos.

1.3. Esquema del trabajo

La estructura del procedimiento llevado a cabo a lo largo de este trabajo se presenta a continuación en la Figura 1. A continuación se describe el contenido de cada capítulo de este documento.

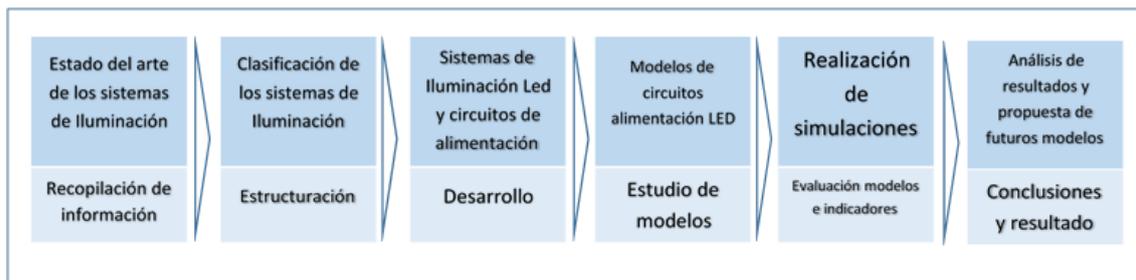


Figura 1. Esquema desarrollo trabajo iluminación LED y su comportamiento armónico.

Capitulo II Fuentes de iluminación: Presentación de las distintas tecnologías de iluminación y sus características.

Capitulo III Circuito equivalente lámparas LED y forma de onda de la corriente consumida: Estudio y presentación de los distintos circuitos de alimentación para sistemas de iluminación LED. Elaboración de modelos de simulación en Matlab/Simulink para estudiar la forma característica de la corriente consumida por las lámparas de LEDs y la corriente a la entrada y la salida de sus drivers.

Capitulo IV Conclusiones: Análisis de resultados y conclusiones, balance de objetivos alcanzados y no alcanzados, posibles mejoras y trabajos futuros.

2. Fuentes de iluminación

Una lámpara es un convertidor de energía cuyo principal propósito es la transformación de energía eléctrica en radiación electromagnética visible aunque pueda realizar otras funciones. En la antigüedad la iluminación artificial se lograba gracias a fogatas que se utilizaban para calentarse y protegerse de animales salvajes. Las chispas que saltaban de estas fogatas se convirtieron en las primeras antorchas, siendo el primer ejemplo de fuente de iluminación artificial utilizada.

A partir de esta época el hombre ha intentado mejorar la producción de luz; en este afán de desarrollo aparecen las lámparas de aceite usadas hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX, después aparecieron las velas, lámparas de gas y más tarde en 1.879 aparece la primera lámpara eléctrica incandescente de la mano de Thomas Alva Edison. Aunque ya antes otros investigadores habían desarrollado otros modelos, la patente de Edison fue la que popularizó esta herramienta para la iluminación.

Actualmente el uso de sistemas de iluminación y sus aplicaciones, representan un 20% del consumo de toda la electricidad de la Unión Europea (EU) y Estados Unidos (UE), mientras que en los países denominados emergentes y pobres esta fracción del consumo es mayor. Organismos como la Agencia Internacional de la Energía (IEA) han realizado estimaciones que indican que los sistemas de iluminación son responsables de emisiones del orden de 1.900 Mt CO₂ por año. Este volumen de emisiones corresponde al 70% de todas las emisiones de los vehículos ligeros del mundo. De estas emisiones el 80% está ligado con la generación eléctrica y el 20% restante a la combustión directa de parafina y lámparas de aceite usadas por 1,6 billones de personas que no tienen acceso a la electricidad [6].

Es por estos motivos que la mejora de la eficiencia energética de los equipos de iluminación junto con la electrificación y sustitución de las lámparas de combustible líquido por lámparas eléctricas, es de gran importancia para la reducción y control de las emisiones de CO₂. Las bombillas incandescentes, solo convierten entre un 1% y un 5% de la electricidad que consumen en luz visible, esto ha hecho que se conviertan en foco de atención para el ahorro energético ya que la iluminación es uno de los principales componentes del consumo en distintos sectores. Como resultado de este interés gobiernos de países de todo el mundo han realizado modificaciones en sus legislaturas y regulaciones para la eliminación gradual de las bombillas incandescentes convencionales durante la actual década, y es probable que más países se unan a estas iniciativas [6].

De forma simplificada la producción de luz está basada en los fenómenos físicos de la incandescencia y la luminiscencia. Además, este último fenómeno puede producirse por la fotoluminiscencia o descarga en gas y por la electroluminiscencia. A continuación se presenta como están clasificadas las fuentes de iluminación artificial considerando los fenómenos anteriores.

- Lámparas de Incandescencia:
 - Estándar (General Service Incandescent Lamps, GSILs).
 - Halógenas (Halogen Lamps, HLs).
- Lámparas de luminiscencia:

- Fotoluminiscencia (Discharge Lamps, DLs):
 - Fluorescente lineal (Fluorescent Lamps, FLs. Fluorescent Tubes, FTs).
 - De Alta intensidad (High Intensity Discharge Lamps, HIDLs).
 - Vapor de sodio a baja presión (Low Pressure Sodium Lamps, LPSLs).
 - Gas a baja presión por inducción (Gas Discharge Lamps, GDLs).
 - Vapor de sodio de alta presión (High Pressure Sodium Lamps, HPSLs).
 - Vapor de mercurio a alta presión (Metallic Vapor Lamps, MVLs).
 - Vapor de mercurio con halogenuros metálicos (Metallic Halide Lamps, MHLs).
 - Fluorescentes compactos o de bajo consumo (Compact Fluorescent Lamps, CFLs).
- Electroluminiscencia:
 - Lámparas de estado sólido de diodos emisores de luz (Solid State Lamps-Light Emitting diodes SSLs-LEDs).

Comparativa entre algunas de las características de los tipos de lámparas.					
Tipo de Lámpara	Potencia (W)	Flujo luminoso φ (lm)	Rendimiento (Lm/W)	IRC (Ra)	Vida Útil Aprox. (hrs)
Incandescente estándar	5-500	730	12	75	1.000
Incandescente con halógenos	12-100	1.250	13	80	2.000
Fluorescentes lineal	18-58	1.350-3.750	75-64,65	85-98	7.500
Descarga de alta intensidad	18-2.000	4.000-4700	-	50-85	6.000-24.000
Vapor de sodio a baja presión	18-180	1.800-32.000	100-177,77	Nulo	14.000
Gas a baja presión por inducción	55-165	3.500-12.000	65-70	80	60.000
Vapor de sodio de alta presión	50-1.000	4.000-130.000	80-130	20-65	12.000 -18.000
Vapor de mercurio a alta presión	50-1.000	1.800-58.000	36-58	50	14.000
Vapor de mercurio con halogenuros metálicos	35-150	3.400-12.500	97,14-83,33	60-93	2.500 -4.000
Fluorescentes compactas o de bajo consumo	4-100	660	65	85	10.000
LED's.	4-15*	180-1.055*	41-60	90	100.000

*Existen niveles superiores desarrollados en LED Tubes

Tabla 1. Comparativa entre distintas características típicas de los tipos de lámparas.

Algunas características para ciertas potencias de los anteriores tipos de lámparas descritas se muestran en la Tabla 1. De manera previa a la descripción y de igual forma que la comparativa respecto de las características de las lámparas, también se ha elaborado una tabla comparando el balance energético para algunos tipos de lámparas que vamos a estudiar (véase Tabla 2).

Balance energético de los tipos de lámparas.					
Tipo de Lámpara	Perdidas por calor (%)	Luz Ultravioleta (%)	Luz Infrarrojo (%)	Luz Visible (%)	Balance energético
Incandescente estándar	85	0	0	15	100
Incandescente con halógenos	60	0	14,5	25	99,5
Fluorescentes lineal	71,5	0,5	0	28	100
Descarga de alta intensidad*	-	-	-	-	-
Vapor de sodio a baja presión	44	0	25	31	100
De gas a baja presión por inducción	40	0	0,5	58	98,5
Vapor de sodio de alta presión	56	0	3,5	40,5	100
Vapor de mercurio a alta presión	64,5	4	15	16,5	100
Vapor de mercurio con halogenuros metálicos	50	1,5	24,5	24	100
Fluorescentes compactas o de bajo consumo	40	0	0	58	98
LED's.	5	0	0	92,5	97,5

*Los valores característicos de las lámparas HID son aproximados a HM y HPS

Tabla 2. Balance energético entre algunos de los tipos de lámparas.

2.1. Incandescencia

Incandescencia es la característica que poseen los materiales sólidos y líquidos de emitir radiación visible al calentarse a temperatura superior a los 1.000 K. Las lámparas incandescentes usan este principio, emiten radiación mediante el calentamiento de un filamento por el cual se hace pasar una corriente.

2.1.1. Lámparas incandescentes estándar

Es la tecnología de iluminación quizás más aceptada a nivel doméstico [1]. A nivel industrial, el consumo puede ser elevado y por este motivo se sustituye por otras alternativas. Actualmente, en países de la Unión Europea se ha limitado su comercialización. Este tipo de lámparas utilizan un filamento de *wolframio* (también denominado *volframio* o *tungsteno*) dentro de un globo de vidrio vacío o lleno de un gas inerte, evitando la evaporación del wolframio y reduciendo el ennegrecimiento del globo de vidrio.

Las partes constructivas que conforman una lámpara incandescente estándar, están representadas en la Figura 2 y se describen a continuación:

- **Casquillo:** Es la parte que establece la conexión de la lámpara con la alimentación eléctrica, puede ser de rosca (Edison E-27) o bayoneta (dos patas).
- **Filamento:** La eficacia de la luz de este tipo de lámparas depende de la temperatura que pueda alcanzar el filamento, a mayor temperatura, mayor energía radiada dentro del espectro visible. Por ello un elevado punto de fusión es importante, pero no es la única característica deseada, también lo es una baja presión de vapor y una buena ductilidad. El *wolframio* cumple estas características. No obstante, la proximidad al punto de fusión limita la vida de la lámpara, siendo necesario establecer una relación entre las características mencionadas y la vida útil de lámpara.
- **Gas de relleno:** Para mejorar el tiempo de vida del bulbo se utilizan gases no reactivos que además evitan su ennegrecimiento y las pérdidas de calor por convección.

- **Globo de vidrio o bulbo:** Este determina la forma de la lámpara, construido con distintos tipo de vidrio que deben soportar elevadas temperaturas.

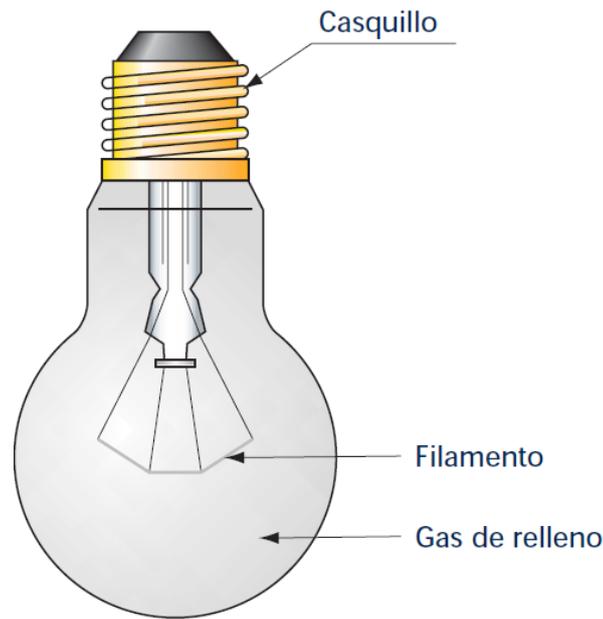


Figura 2. Partes constructivas de una lámpara incandescente [1].

En estas lámparas, la energía luminosa obtenida es reducida comparada con la energía calorífica que irradian, puesto que la mayor parte de la energía irradiada se pierde en forma de calor, siendo su eficiencia luminosa reducida. Sin embargo tienen la ventaja de que se conectan directamente a la red y no requieren ningún equipo auxiliar para su funcionamiento, lo cual simplifica su utilización e instalación.

2.1.2. Lámparas incandescentes con halógenos

Las altas temperaturas que alcanzan las lámparas incandescentes producen que el filamento de *wolframio* se evapore, depositándose en la superficie del bulbo y provocando la opacidad de la lámpara. En las lámparas halógenas se ha incorpora un componente *halógeno* (yodo, cloro, bromo) al gas de relleno y trabajan con ciclo regenerativo halógeno para evitar el oscurecimiento de la bombilla [1]. Cuando el wolframio se evapora dentro del bulbo se combina con el halógeno para formar un compuesto de wolframio y halógeno (*haluro de wolframio*), que se mantiene en estado gaseoso, siendo la temperatura suficientemente elevada para prevenir su condensación, cuando este compuesto se encuentra próximo al filamento de wolframio se descompone de nuevo para formar parte del filamento y el halógeno permanece dentro del bulbo continuando con el ciclo regenerativo halógeno (ver Figura 3).

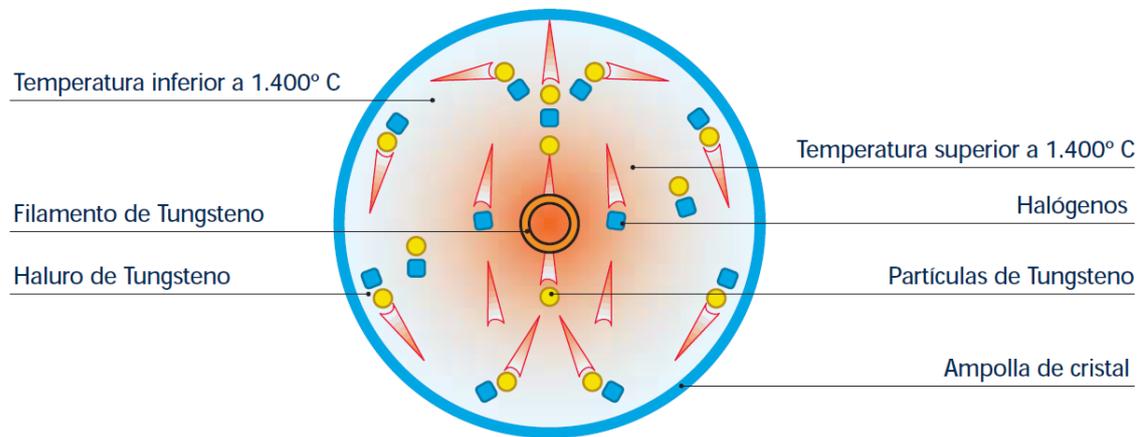


Figura 3. Ciclo del halógeno [1].

La principal diferencia con las lámparas incandescentes convencionales a parte del aditivo halógeno dentro de la lámpara, está en la ampolla. Debido a que la temperatura de la ampolla debe ser alta para que no tenga lugar la condensación del haluro de wolframio, las lámparas halógenas son más pequeñas que las lámparas incandescentes convencionales, además el globo es fabricado de cuarzo en lugar de vidrio para soportar las altas temperaturas. Este tipo de lámparas presenta mayor durabilidad, eficiencia luminosa, temperatura de color y menor pérdida luminosa y tamaño que las lámparas incandescentes convencionales.

2.2. Lámparas de luminiscencia

La luminiscencia es el proceso en el que la energía es absorbida por la materia y luego es reemitida en forma de fotones [2]. A diferencia de la incandescencia, no necesita una fuente de *excitación térmica* (elevada temperatura de un filamento) para la producción de luz ya que esta se produce por la absorción de un fotón o una colisión con otro, como lo son los electrones energéticos en un tubo de rayos catódicos. Los fotones son emitidos cuando los electrones vuelven a su estado base con una frecuencia correspondiente al salto energético que ha realizado. Este comportamiento se denomina *fotoluminiscencia*. Otra forma de luminiscencia, es la *electroluminiscencia*, donde la excitación puede ocurrir por la recombinación de portadores de carga (electrones o iones libres) en ciertos semiconductores o mediante la excitación de centros luminiscentes en fósforos emisores de luz. Ejemplos de estos comportamientos se observan en los diodos emisores de luz (Light Emitting Diodes LEDs) y los paneles electroluminiscentes.

2.2.1. Fotoluminiscencia

Las lámparas basadas en la fotoluminiscencia se denominan lámparas de descarga en gas (Discharge Lamps, DLs). Estas lámparas son más efectivas que las de incandescencia funcionando a altas temperaturas y con sus consecuentes pérdidas debido a la baja luz visible emitida en relación con el calor desprendido. Un ejemplo es el uso de fluorescentes compactas (CFLs) en lugar de incandescentes (GSILs) y que puede representar un ahorro energético del 80% para valores de luz similares [7]. Si un gas confinado en un espacio o *tubo de descarga* con dos electrodos en sus extremos se le aplica un campo eléctrico los átomos del gas se deben ionizar (ya que los gases normalmente no poseen iones libres para que sea posible la conducción) obteniendo electrones e iones libres. Este flujo de

electrones, en el que los electrones se desplazan hacia el ánodo y los iones hacia el cátodo, se llama *descarga*.

Las propiedades de una descarga en un gas pueden caracterizarse por la presión (baja o alta). Debido a esto podría darse otra clasificación a las lámparas de luminiscencia:

➤ Fotoluminiscencia:

- Descarga en gas a baja presión:
 - Fluorescente lineal (Fluorescent Lamps, FLs. Fluorescent Tubes, FTs).
 - Fluorescentes compactas o de bajo consumo (Compact Fluorescent Lamps, CFLs).
 - Descarga de alta intensidad (High Intensity Discharge Lamps, HIDLs).
 - Vapor de sodio a baja presión (Low Pressure Sodium Lamps, LPSLs).
 - Gas a baja presión por inducción (Gas Discharge Lamps, GDLs).
- Descarga en gas a alta presión:
 - Vapor de mercurio a alta presión (Metallic Vapor Lamps, MVLs).
 - Vapor de mercurio con halogenuros metálicos (Metallic Halide Lamps, MHLs).
 - Vapor de sodio de alta presión (High Pressure Sodium Lamps, HPSLs).

Cuando en un tubo de descarga de unos centímetros de diámetro y aproximadamente de un metro de longitud, que contiene uno o más gases a una presión inferior a la atmosférica y por el que circula una corriente de uno o dos amperios, el calentamiento en el gas es insignificante y se habla de una *descarga de baja presión*. En estas lámparas la ionización se produce principalmente por choques de electrones y su interacción produce la radiación lumínica [2].

Si aumenta la presión del gas dentro del tubo, hablamos de una *descarga de alta presión*. Este incremento de presión también produce un aumento en la temperatura del gas, dicho aumento de temperatura se localiza en el centro de la descarga generando gradientes hacia las paredes, que favorecen la ionización y excitación. En este tipo de descargas las paredes son menos importantes y pasan a serlo los electrodos en donde se producen las descargas, estos son más robustos y debido a que el flujo radiante por unidad de superficie de arco es elevado, se puede reducir el tamaño de la lámpara en comparación con las de baja presión. Su diferencia más importante radica en la composición espectral de la radiación emitida, ya que al aumentar la presión aumenta la emisión de líneas de radiación generando un espectro casi continuo de radiación y presentando por tanto un mejor rendimiento del color en función del gas utilizado [2].

El empleo de lámparas de descarga de baja o alta presión se aplica en función del uso al que se destinen. La descripción para las distintas lámparas de descarga así como los equipos auxiliares que tienen asociados dichas lámparas se presentan a continuación.

2.2.1.1. Fluorescente lineal

En este tipo de lámparas la descarga se produce en *vapor de mercurio a baja presión*, donde la luz se consigue mediante polvos fluorescentes activados por la energía ultravioleta de la

descarga [1]. El bulbo de esta lámpara generalmente es tubular alargado y sellado en cada extremo por los terminales, contiene vapor de mercurio a baja presión y una pequeña cantidad de un gas inerte para el arranque y regulación del arco, su superficie está recubierta por una sustancia luminiscente y que determina la cantidad de luz emitida y la temperatura del color de la lámpara.

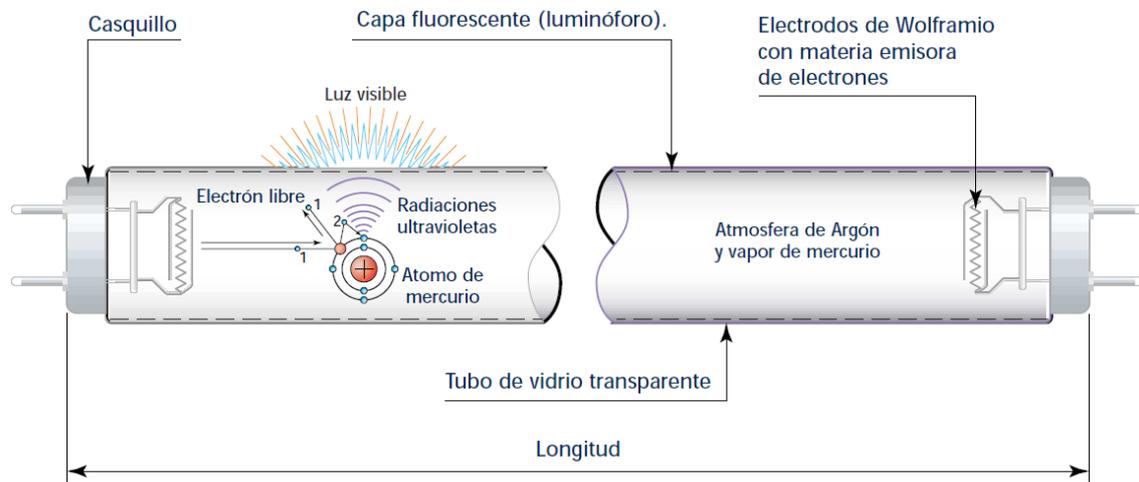


Figura 4. Lámpara fluorescente [1].

Las partes que forman la lámpara fluorescente se muestran en la Figura 4 y son las siguientes:

- **Ampolla:** Normalmente hecha de vidrio de cal-soda suavizado con óxido de hierro que brinda cierto control de la transmisión ultravioleta de onda corta.
- **Revestimiento fluorescente:** Este determina las características de la lámpara, debido a que fija la temperatura del color (como consecuencia la apariencia del color), su índice de reproducción cromática (IRC) y en gran parte, la eficiencia lumínica de la lámpara. Son polvos de fósforo de tipo estándar, tri-fósforos o multi-fósforos.
- **Electrodos:** Son los elementos que poseen el material emitido para la conducción eléctrica proporcionando los electrones necesarios para mantener la descarga.
- **Gas de relleno:** Mezcla de mercurio saturado y un gas inerte (argón o criptón).

Este tipo de equipos de iluminación rondan una temperatura del color de entre 2.700-6.500K, y los colores reproducidos varían en función del tipo de fósforo del revestimiento del tubo y se clasifican según la normas del CIE (International Commission on Illumination). Precisan además un equipo auxiliar formado por un balasto e ignitor (cebador), además de un condensador para la mejora del factor de potencia. Los valores nominales de funcionamiento se alcanzan al cabo de cinco minutos aproximadamente. Al apagar la lámpara, es necesario que ésta se enfríe entre cuatro y quince minutos para encenderse nuevamente debido a la presión en el quemador.

2.2.1.2. Descarga de alta intensidad

Las lámparas de descarga de alta intensidad (HIDLs) incluyen un grupo de lámparas de las conocidas lámparas de mercurio (MVLs), mercurio halogenado (MHLs), vapor de sodio a

baja presión (LPSLs) y vapor de sodio a alta presión (HPSLs) que son ampliamente utilizadas en luminotecnia [5].

Todas estas lámparas producen luz mediante una descarga eléctrica de arco en un bulbo interior o tubo de descarga el cual a su vez está dentro de un bulbo exterior. El tubo de arco contiene electrodos sellados en cada extremo y contiene un gas de encendido que es relativamente fácil de ionizar a baja presión y temperatura ambiente. Este gas de encendido es generalmente argón, xenón o mezcla de argón y neón o argón y xenón dependiendo del tipo de lámpara. El tubo de arco también contiene metales compuestos de halogenuros metálicos que, cuando se evaporan durante la descarga producen líneas características de la energía radiante, de modo que cada tipo de lámpara de descarga de alta intensidad produce luz (Lm), temperatura del color (K), índice de reproducción cromática (IRC), rendimiento del color, eficiencia energética (Lm/W) y vida útil de acuerdo con el tipo de metal contenido en el arco.

2.2.1.3. Vapor de sodio a baja presión

Su funcionamiento es similar a los fluorescentes lineales, la diferencia se produce al convertir la radiación ultravioleta de la descarga de mercurio en radiación visible, puesto que en estas lámparas la descarga se produce sobre *vapor de sodio* [1]. Generalmente el tubo de una lámpara de vapor de sodio tiene forma de *U*, se encuentra dentro de una cubierta de vidrio vacío y está recubierto con una capa de óxido de *indio*. El vacío junto con el revestimiento ayuda a mantener la temperatura de trabajo adecuada y disminuye la pérdida de calor, logrando mejor eficiencia luminosa. El gas *neón* presente dentro de la lámpara sirve para el inicio de la descarga y para generar el calor necesario para la vaporización del sodio. Este responde por la luminiscencia rojo-anaranjado durante los primeros minutos de trabajo. El sodio metálico se evapora de forma gradual y por tanto el color rojo de la descarga inicial pertenece al neón, hasta que la lámpara alcanza su máximo flujo luminoso en aproximadamente diez minutos y el color se torna más blanco. Su eficiencia luminosa es de hasta 200 lm/W y son equipos de larga vida.

Por este motivo se utiliza en lugares donde no interesa la reproducción del color y sí el reconocimiento del contraste: Autopistas, puertos, playas etc. Las partes principales se observan en la Figura 5.

- **Tubo de descarga y soportes:** Generalmente el tubo de descarga es en forma de U, este diseño pretende aprovechar el espacio y mejorar el aislamiento térmico. Hecho de vidrio de *cal-soda* y revestida en el interior de *vidrio de borato* para formar una capa protectora contra el vapor de sodio. Además, el tubo posee ciertas hendiduras donde se deposita el sodio durante su fabricación.
- **Relleno del tubo de descarga:** Relleno de sodio metálico de alta pureza y una mezcla de *neón* y *argón* que actúa como gas de arranque y amortiguamiento.
- **Electrodos:** Son electrodos de arranque frío. Consiste en un alambre de *wolframio* triple que permite emitir gran cantidad de material.
- **Ampolla externa:** Vacía y revestida con una fina película de un material infrarrojo. El reflector infrarrojo sirve para reflejar la mayor parte de la radiación de calor que vuelve al tubo de descarga, manteniendo la temperatura deseada y transmitiendo la radiación visible al mismo tiempo.

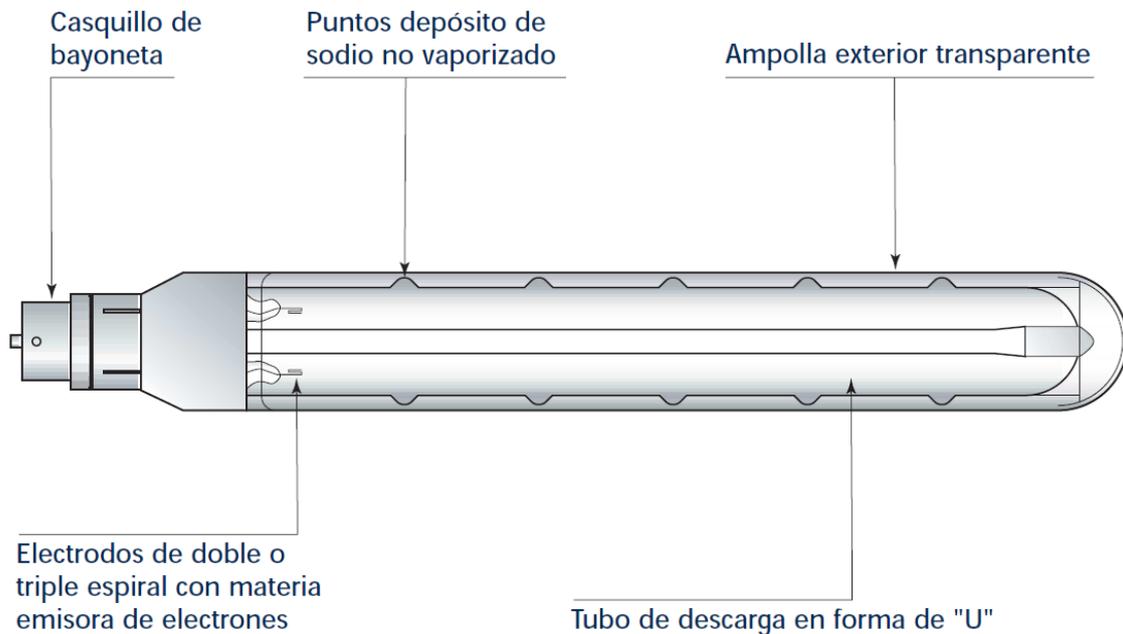


Figura 5. Lámpara de sodio a baja presión [1].

Las lámparas de sodio de baja presión necesitan de un equipo auxiliar formado por un alimentador con auto transformador o balasto e ignitor y según el tipo, precisan condensador de compensación. Los valores nominales de encendido se alcanzan aproximadamente al cabo de quince minutos y es necesario que la lámpara se enfríe una vez apagada para ser encendida de nuevo.

2.2.1.4. Gas a baja presión por inducción

Este tipo de lámparas consta de un recipiente de descarga que contiene el gas a baja presión y un acoplador de potencia (núcleo compuesto de *ferrita*) que crea un campo electro-magnético dentro del recipiente de descarga, que a su vez induce una corriente eléctrica en el gas, generando su ionización. La energía necesaria para iniciar y mantener la descarga es suministrada al acoplador de potencia por un cable coaxial de longitud determinada a través de un generador de alta frecuencia que forma parte del circuito oscilador.

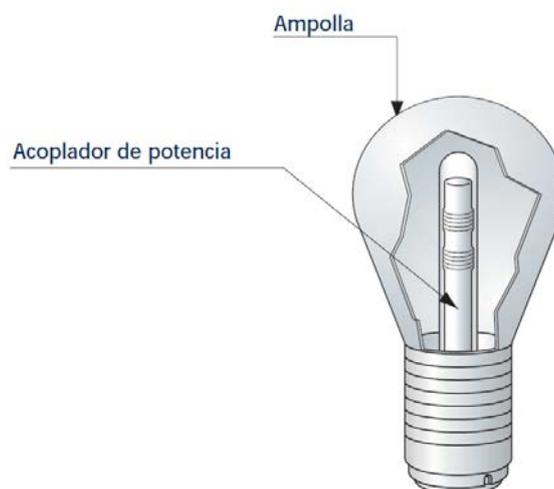


Figura 6. Lámpara de gas a baja presión por inducción [1].

2.2.1.5. Vapor de sodio de alta presión

En esta lámpara la presión de sodio es mucho más elevada que en las de lámparas de sodio de baja presión lo que marca las diferencias en ambas. Las lámparas de sodio a alta presión están llenas con un exceso de sodio para dar condiciones de *vapor saturado* cuando la lámpara está funcionando y también incluye un exceso de *mercurio* y *xenón* para facilitar el encendido y limitar la conducción del calor del arco de descarga a las paredes del tubo, dicho tubo de descarga está alojado dentro de una envoltura de vidrio vacía [1]. Estas lámparas irradian parte de la energía dentro del espectro visible y por tanto ofrece una reproducción del color más aceptable. Las partes constructivas de este tipo de lámparas se observan en la imagen de la Figura 7.

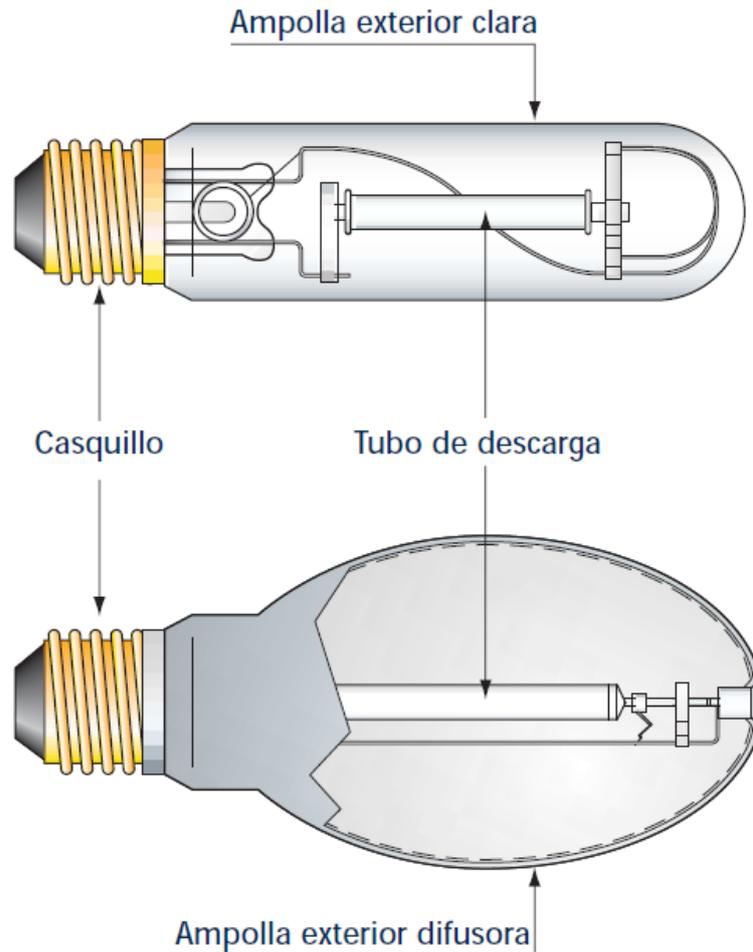


Figura 7. Lámpara de vapor de sodio a alta presión [1].

- **Tubo de descarga:** Fabricado de cerámica de óxido de aluminio (aluminio sintetizado), resistente al calor y a las reacciones químicas del vapor de sodio.
- **Electrodos:** Cubierto de una capa de material emisor, consiste en una varilla de *wolframio* con una serpentina del mismo material alrededor de dicha varilla.
- **Relleno:** El tubo de descarga está lleno de sodio, mercurio y un gas noble (*xenón* o *argón*) de los cuales el sodio es el principal productor de luz.
- **Ampolla externa:** Generalmente vacía, de forma oval o tubular con un revestimiento interno de un polvo blanco, puesto que el sodio apenas produce radiación ultravioleta y que permite disminuir el elevado brillo de la lámpara.

- **Arrancadores y arrancadores auxiliares:** Muchas de estas lámparas poseen un arrancador auxiliar incorporado y que reduce el pico de voltaje de encendido. A veces el arrancador incorporado y el auxiliar se encuentran en la misma lámpara.

Estos equipos precisan equipo auxiliar formado por un balasto e ignitor con tensión de pulso según el tipo y condensador de compensación. Al cabo de cinco minutos alcanza los valores nominales de encendido y al apagarse necesita enfriarse entre cuatro y quince minutos debido a la gran presión del quemador.

2.2.1.6. Vapor de mercurio a alta presión

En estas lámparas la descarga se produce en un tubo de descarga de *cuarzo* que contiene una pequeña cantidad de *mercurio* y está relleno de un gas inerte, generalmente *argón* para favorecer el encendido [1]. Una parte de la radiación de la descarga se emite en la región visible y otra parte en la ultravioleta. La superficie interna de la ampolla exterior está cubierta con un polvo fluorescente para convertir la radiación ultravioleta en visible. Su funcionamiento está caracterizado por tres fases, ignición, encendido y estabilización.

- **Ignición:** Lograda a partir de un electrodo auxiliar o de arranque, ubicado cerca al electrodo principal y conectado a éste a través de una resistencia de alto valor. Al encender la lámpara se genera un gradiente de alto voltaje entre los electrodos principales y de arranque, ionizando el gas de relleno de la zona en forma de descarga *luminiscente*, siendo la corriente limitada por una resistencia. La descarga posteriormente se propaga por todo el tubo debido a la influencia del campo magnético de los dos electrodos principales. Después la corriente aumenta caldeando los electrodos y provocando un aumento de temperatura que permitirá que la descarga luminiscente pase a descarga de arco.
- **Encendido:** Ionizado el gas inerte, aun la lámpara no ofrece su máxima producción de luz hasta que el mercurio presente en el tubo esté completamente *vaporizado*. Esto ocurre después de cierto tiempo, denominado de encendido. Como resultado de la descarga de arco se produce un aumento rápido de la temperatura, evaporando parcialmente el mercurio, aumentando la presión y concentrando la descarga hacia el eje del tubo. Al aumentar la presión, la energía radiada se concentra y produce una luz más blanca, después de cierto tiempo el arco se estabiliza y se dice que la lámpara alcanza un punto de equilibrio termodinámico, evaporando todo el mercurio y produciendo la descarga en *vapor de mercurio no saturado*. El tiempo de encendido en el que se alcanza la producción de un 80% de la luz es de cuatro minutos aproximadamente.
- **Estabilización:** La lámparas de mercurio de alta presión, tienen una característica de resistencia negativa y por tanto no puede operar por su cuenta en un circuito sin un balasto adecuado para estabilizar el flujo de corriente a través de ella.

Las partes que constituyen esta lámpara se observan en la Figura 8.

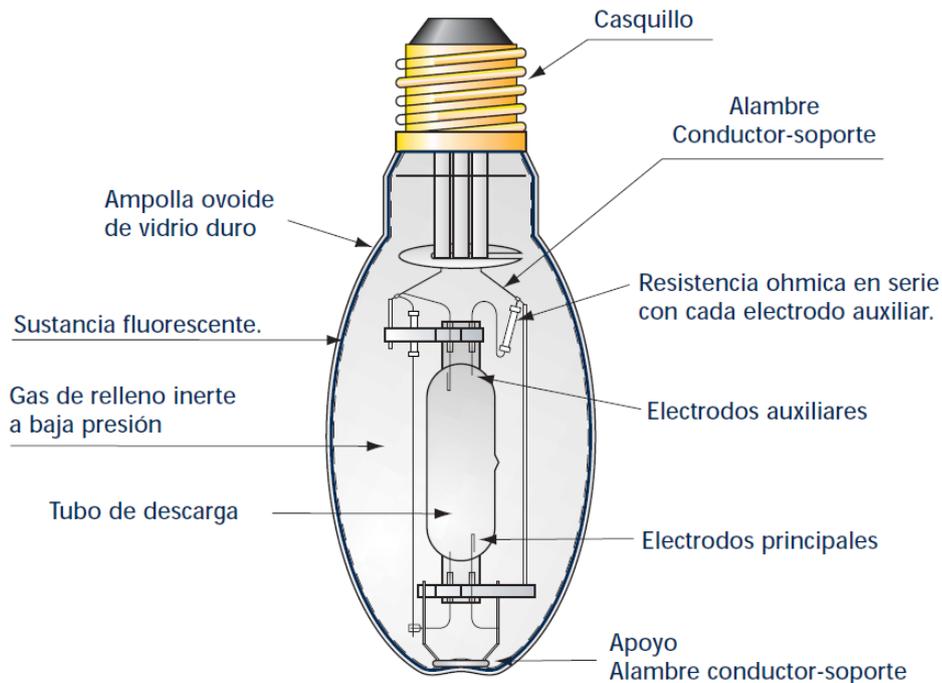


Figura 8. Lámpara de vapor de mercurio [1].

- **Tubo de descarga y soporte:** El tubo de descarga está hecho de cuarzo, con baja absorción a la radiación ultravioleta y visible, y capaz de soportar altas temperaturas.
- **Electrodos:** Cada electrodo principal está compuesto de una varilla de wolframio, revestido en el extremo por una serpentina de wolframio impregnada con un material para favorecer la emisión de electrones. El electrodo auxiliar es simplemente un trozo de alambre de *molibdeno* o *wolframio* próximo a un electrodo principal y conectado al otro mediante una resistencia de alto valor (25k Ω).
- **Ampolla exterior:** Puede ser de vidrio cal-soda para potencias de hasta 125W, pero para potencias superiores se fabrican en vidrio de *boro silicato* para soportar las altas temperaturas de trabajo. La ampolla exterior normalmente contiene un gas inerte (*argón* o una mezcla de *argón* y *nitrógeno*).
- **Revestimiento de la ampolla:** Generalmente *fósforo blanco* para mejorar la reproducción del color y aumentar el flujo luminoso. Este convierte parte de la radiación ultravioleta en radiación visible.
- **Gas de relleno:** La ampolla exterior está rellena de un gas inerte (*argón*), que asegura el origen de la descarga y vida de los electrodos y una dosis precisa de *mercurio destilado*.

Estas lámparas necesitan un equipo auxiliar, normalmente un balasto con resistencia inductiva o transformador de campo de dispersión, además de un condensador de compensación. Una vez se apaga no puede encenderse hasta que la temperatura sea lo suficientemente baja para que la presión del vapor sea la justa para que pueda volver a encender el arco. Este periodo es aproximadamente de cinco minutos.

2.2.1.7. Vapor de mercurio con halogenuros metálicos

Son lámparas de vapor de mercurio a alta presión que además contienen *halogenuros de tierras raras* como *disprosio* (Dy), *holmio* (Ho) y el *tulio* (Tm) [1]. Los halogenuros son vaporizados cuando se alcanza la temperatura normal operativa, disociándose dentro de la zona central del arco en halógeno y metal y aumentando la eficacia luminosa. Las partes principales se observan en la siguiente Figura 9 y se describen a continuación:

- **Tubo de descarga:** De cuarzo puro. A veces se aplica una capa blanca de *óxido de circonio* en la parte externa de las cavidades del electrodo para aumentar la temperatura de la pared.
- **Electrodos:** Similares a los que posee la lámpara de vapor de mercurio.
- **Ampolla externa:** El vidrio exterior de las lámparas con halogenuros están fabricados en vidrio duro o *cuarzo* y las hay que poseen una ampolla externa. La superficie interna con forma oval está cubierta de una capa de *fósforo* para convertir la radiación ultravioleta en visible, aunque los halogenuros producen poca radiación ultravioleta por tanto esta conversión es pobre.
- **Gas de relleno en el tubo de descarga:** Gas inertes *neón* y *argón* o *criptón* y *argón*, dosis de mercurio y haluros apropiados de acuerdo al tipo de lámpara.
- **Gas de relleno en la ampolla externa:** Relleno de una mezcla de *neón* y *argón*, que debe estar a la misma presión que el *neón* de fuera de la ampolla. En caso de que la mezcla sea *criptón* y *argón*, la presión se puede igualar a la del *nitrógeno*.

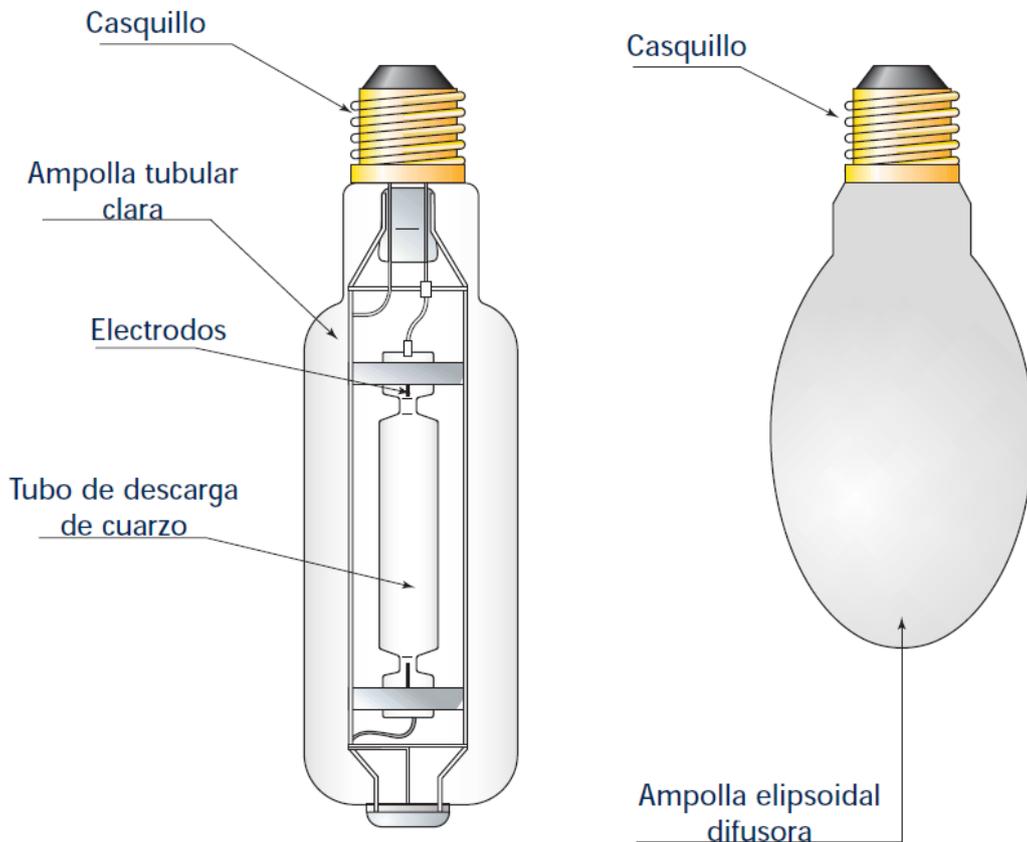


Figura 9. Lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos [1].

El funcionamiento es similar a las lámparas de vapor de mercurio convencionales, siendo conectadas en serie con un balasto limitador de corriente y necesitando condensador de compensación. Debido a los haluros el encendido se produce a tensión elevada, necesitando el empleo de cebador o aparato de encendido con tensiones de choque de 0,8 y 5kV. Estos equipos permiten el encendido inmediato con las lámparas en caliente (después de apagadas), mediante el empleo de tensión de choque de 35 a 60kV. En caso contrario es necesario que se enfríen entre cuatro y quince minutos para ser encendidas nuevamente.

2.2.1.8. Fluorescentes compactas o de bajo consumo

También conocidas como lámparas de bajo consumo, aunque en realidad la diferencia con las fluorescentes radica en el tamaño, forma y posibilidad de adaptarse a instalaciones diseñadas para lámparas incandescentes. Los fluorescentes compactos aparecieron en un intento de adaptar las lámparas fluorescentes como sustitutos de las lámparas incandescentes. Estas lámparas se desarrollan a partir de uso de materiales con base de *fósforos* compuestos por tierras raras, los cuales emiten radiaciones de banda estrecha en el espectro de luz visible. Estos fósforos permiten elevar la carga del tubo fluorescente, incrementando el flujo luminoso sin degradación de la vida útil de la lámpara [6].



Figura 10. Izquierda. Lámpara fluorescente compacta sin balasto. Derecha. Lámpara fluorescente compacta con balasto integrado [6].

Las partes constructivas se describen a continuación (ver también Figura 11):

- **Ampolla:** Encarga de contener el tubo de descarga. También existen modelos en los que la ampolla se suprime.
- **Tubo de descarga:** De forma de *U* con un diámetro de 6 mm aproximadamente, el tamaño varía en función de la potencia. En los extremos del tubo cuenta con filamentos de tungsteno o wolframio que tienen la misión de calentar los gases del interior del tubo. Las paredes internas del tubo están revestidas de una fina capa de fosforo.

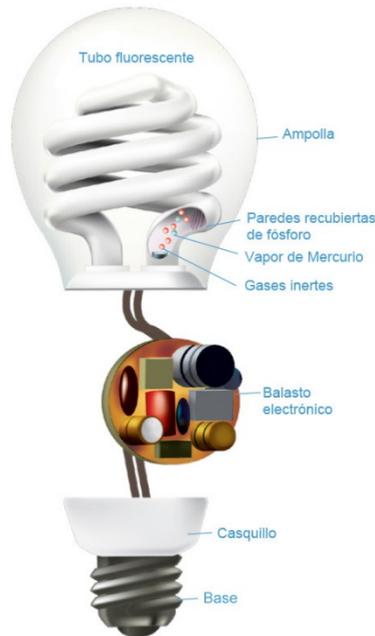


Figura 11. Lámpara fluorescente compacta [9].

- Balasto:** Originalmente las lámparas fluorescentes compactas incluían un balasto *inductivo* convencional pero no era una solución demasiado práctica en comparación con las lámparas incandescentes debido a su gran volumen y peso. Más tarde la separación de ambos permitió reducir el peso de la lámpara y, dado que la vida del balasto es mayor, tener soluciones más sencillas y económicas. No obstante, esta solución obliga a utilizar casquillos especiales que precisan luminarias especialmente concebidas. Esto impide utilizar los casquillos de rosca Edison E27 de las lámparas de incandescencia y por tanto su sustitución directa. Posteriormente, aparecieron los balastos electrónicos que pueden ser incorporados a la lámpara (y por tanto mantener la rosca E27) sin incrementar excesivamente su peso y volumen. Así, en la actualidad existen dos tipos de CFLs, con balasto electrónico integrado y sin balasto integrado pero con casquillo especial (ver Figura 10). En el caso de los balastos integrados, están ubicado en la base que separa la rosca del tubo de la lámpara suministrando la tensión o voltaje necesario para iniciar la descarga y regular, posteriormente, la intensidad de la corriente que circula por dentro del tubo después del encendido.
- Base:** Se compone de un receptáculo de plástico hueco que aloja el balasto (*casquillo*). La base normalmente cuenta con una rosca normal E27 (*rosca Edison*). También existen otros tipos de conectores como de *presión* o *bayoneta*, en lugar de casquillos con rosca, que funcionan con un balasto electrónico externo, que no forma parte del cuerpo de la lámpara.

Actualmente la alta calidad de los equipos y disminución del tamaño de los balastos, de nuevo hace posible la integración de estos en las lámparas.

Una fluorescente compacta comparada con una incandescente son lámparas frías. La mayor parte de la energía que consumen la convierten en luz visible. Utilizan entre un 50% y 80% menos de energía que una lámpara incandescente para producir la misma cantidad de luz y su útil es mucho mayor.

2.2.1.9. Equipos auxiliares de las lámparas de descarga

Son los equipos eléctricos asociados a los distintos tipos de lámpara y por tanto, diferentes para cada una, no obstante, con carácter general los equipos auxiliares más comunes son: Balastos, cebadores y condensadores.

Las características de los equipos auxiliares son función de las características de la red y del tipo y potencia de la lámpara. La Tabla 3 presenta una relación de los equipos auxiliares empleados para los distintos tipos de lámparas.

Equipos auxiliares de las lámparas de descarga				
Tipo de lámpara	Balasto *		Cebador	Condensador
	Electromagnético	Electrónico		
Fluorescentes lineal	Si		Si	Si**
Descarga de alta intensidad	Si		Si	Si
Vapor de sodio a baja presión	Si		Si	Si **
De gas a baja presión por inducción	-	-	-	-
Vapor de sodio de alta presión	Si		Si	Si
Vapor de mercurio a alta presión	Si		No ***	Si
Vapor de mercurio con halogenuros metálicos	Si		No ***	Si
Fluorescentes compactas o de bajo consumo	Si		No	No

* Si el balasto es electrónico no se precisa cebador, ni condensador.

** Según el tipo pueden precisar condensador para la mejora del factor de potencia.

*** Disponen de dispositivo de ignición incorporado.

Tabla 3. Equipos auxiliares usados en los distintos tipos de lámparas de descarga.

Balastos.

Los balastos son los equipos que se encargan de limitar la corriente que circula por la lámpara evitando así su progresivo incremento que llevaría a la destrucción de dicha lámpara. La corriente de la lámpara en su condición de operación nominal, debe ser limitada ya que la resistencia de la descarga eléctrica disminuye con el aumento de la corriente (presenta una característica de resistencia incremental negativa, véase característica $v_A - i$ en la Figura 12). Debido a esto, la reducción en la resistencia del arco que produce el incremento en la corriente llevaría a un progresivo incremento de dicha corriente (es un proceso que se retroalimenta) la cual acabaría alcanzando valores que destruirían la lámpara. Los balastos pueden ser electromagnéticos y electrónicos.

- **Balastos electromagnéticos:** Son una reactancia formada por un núcleo de hierro bobinado con un conductor de cobre. Las bobinas que conforman el balasto son de hilo de cobre esmaltado e impregnado con resinas al vacío que aumentan la rigidez dieléctrica de la bobina, la disipación del calor y reducen las posibles vibraciones del núcleo magnético. Después se introduce la bobina en un contenedor metálico. Son equipos de larga vida útil, robustos y de bajo coste, pero poseen un gran volumen y peso, incrementan las pérdidas de la lámpara, son sensibles a las variaciones y distorsiones de la tensión de alimentación y pueden producir vibraciones, ruido audible y a veces, al trabajar a baja frecuencia, pueden ser perceptibles parpadeos (flicker) en la emisión de luz. Debido al problema de su tamaño, estos balastos son

generalmente instalados en las luminarias donde se encuentran las lámparas, los cebadores y los dispositivos correctores del factor de potencia. En la Figura 13 se muestra un montaje donde se distinguen el balasto electromagnético y la lámpara de descarga. Gracias al balasto electromagnético se consigue tener una característica $v - i$ positiva evitando el fenómeno de la realimentación positiva de la corriente que lleva a su descontrolado incremento. En la Figura 12 se muestran tres tipos de balastos electromagnéticos para lámparas fluorescentes dependiendo del tipo de encendido de la lámpara.

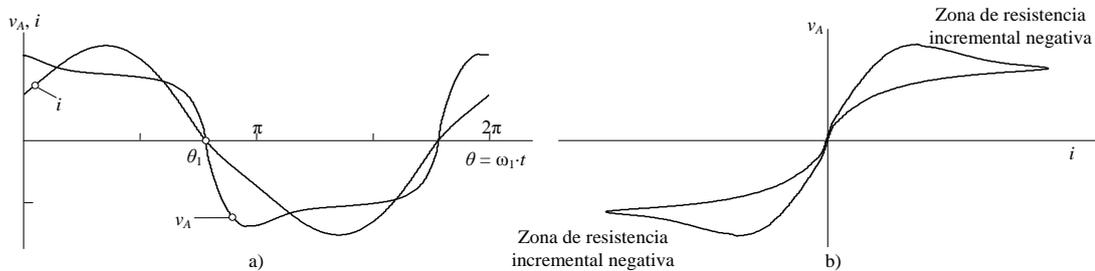


Figura 12. Medición de características de voltaje de arco y corriente de una lámpara de descarga. a) Formas de ondas voltaje y corriente en función del tiempo. b) Relación no lineal voltaje-corriente [6].

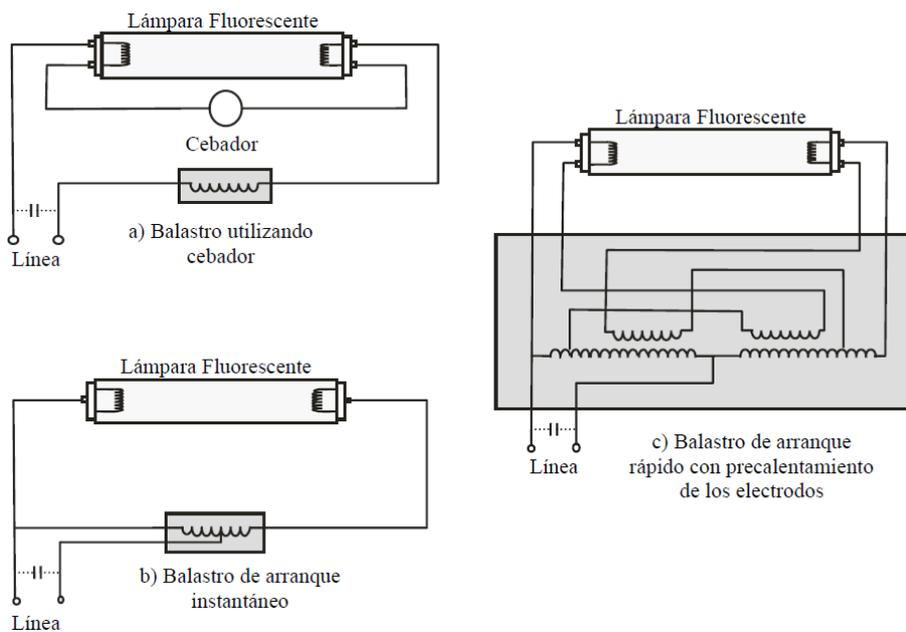


Figura 13. Tipos de balastos electromagnéticos para lámparas fluorescentes. a) Lámparas fluorescentes con encendido por cebador. b) Lámparas fluorescente con encendido por autotransformador. c) Lámparas fluorescentes con encendido con precalentamiento de electrodos [3].

- **Balastos electrónicos:** También denominados de estado sólido, tiene la misma función que el electromagnético, pero realiza la limitación de la corriente usando componentes electrónicos (en lugar de una reactancia) que trabajan a mayores frecuencias. En general, estos dispositivos están formados de un bloque de protección y filtrado para la protección de la lámpara, un rectificador AC/DC, un convertidor DC/DC que permite corregir el factor de potencia y reducir el rizado de la tensión de continua, y un último bloque que conecta un inversor de alta frecuencia con la alimentación de la lámpara (véase Figura 14). Así, un balasto

electrónico actúa de forma diferente al electromagnético: Transforma la corriente alterna en continua (rectificación), para posteriormente transformarla de nuevo en alterna, pero de una frecuencia muy elevada respecto a la original de la red; a esa frecuencia el balasto convencional, pesado y voluminoso, pasa a ser pequeño y ligero y su núcleo es de ferrita (cerámica magnética para alta frecuencia). En el momento de encenderse quedan en serie el generador de alta frecuencia, el nuevo balasto, los filamentos del tubo y un condensador que ocupa el lugar del cebador. Los filamentos del tubo se encienden, y el balasto forma con el condensador un circuito resonante que somete al tubo a una tensión elevada, que enciende el tubo. Una vez encendido el tubo, el balasto deja de resonar, el condensador no actúa, y el conjunto funciona según su proceso natural. Tal como se puede observar en la descripción anterior, además de limitar la corriente consumida por la lámpara, los balastos electrónicos ofrecen otras prestaciones y ventajas.

- Permite el arranque instantáneo de la lámpara y por tanto la eliminación del cebador gracias a la conmutación de alta frecuencia.
- Ofrece la posibilidad de realizar la compensación de la potencia reactiva y por tanto evitar la necesidad de utilizar condensadores.
- Desaparece el parpadeo o flicker.
- Mejor eficiencia del sistema y la lámpara.
- Mayor vida útil de los equipos.
- Regulación del flujo luminoso de la lámpara.
- Conexión sencilla.
- Menor temperatura.
- Equipos más ligeros gracias a la posibilidad de reducir el tamaño de los componentes.
- Desaparece el ruido.

No obstante su utilización está limitada a lámparas de descarga de potencia inferior a 150 W ya que estos balastos electrónicos trabajan a altas frecuencias (decenas a miles kilohertzios) y pueden producir un efecto conocido como resonancia acústica en la lámpara HID. Este efecto es más acentuado en la medida que aumenta la potencia de la lámpara produciendo deformaciones y parpadeo en el arco, flicker y cambio en la temperatura del color. En casos extremos puede producir la extinción de la descarga [6].

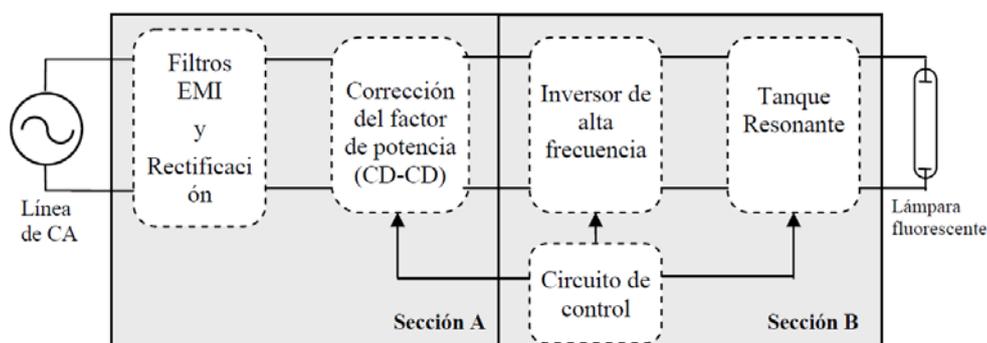


Figura 14. Balasto electrónico convencional [3].

Cebadores.

El cebador es el componente que proporciona en el momento del encendido, bien por sí mismo o en combinación con el balasto, la tensión requerida para el cebado de la lámpara. Estos dispositivos suministran un breve pico de tensión entre los electrodos del tubo de la lámpara necesario para iniciar la descarga y vencer así la resistencia inicial del gas a la corriente eléctrica. Es necesaria su utilización en las lámparas de descarga con balasto electromagnético, [8], siendo una pequeña ampolla de vidrio llena de gas argón a baja presión que posee en la parte exterior dos electrodos, uno de ellos tiene una lámina metálica que por la acción del calor se dobla ligeramente para generar un pico de voltaje necesario para encender la lámpara (véase Figura 15).

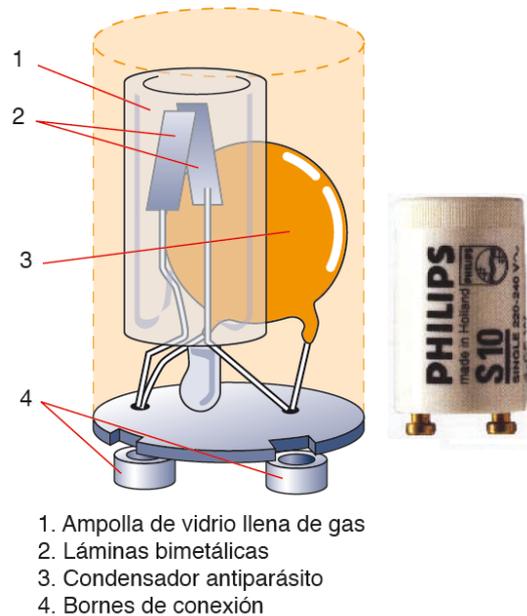


Figura 15. Cebador [9].

El cebador es un componente del equipo auxiliar cuyas características eléctricas tienen una importancia fundamental en la vida de la lámpara. La tensión de pico, la corriente máxima, posición de fase, tensión de conexión e interrupción, tiene que ser la idónea para lo requerido por el tipo y potencia de la lámpara. Desde el punto de vista de la eficiencia energética los cebadores suponen una pérdida entre el 0,8-1,5% de la potencia de la lámpara y además tienen una vida útil limitada [8]. Por todo lo anterior, unido a los inconvenientes de volumen y peso asociados a los balastos electromagnéticos, *el conjunto balasto electromagnético/cebador se ha ido progresivamente sustituyendo por los balastos electrónicos* que, además de limitar la corriente que circula por la lámpara, permite su encendido sin necesidad de incorporar ningún elemento adicional. Casi ninguno de los sistemas de iluminación actuales utiliza balasto electromagnético-cebador.

Condensadores.

El condensador es el componente que corrige el factor de potencia de la lámpara a los valores definidos en normas y reglamentos en vigor. Se utiliza exclusivamente en lámparas de descarga con balastos electromagnéticos con el objeto de compensar el carácter inductivo de estos dispositivos y se halla instalado en las luminarias donde se encuentran

las lámparas. Presentan el inconveniente debido a su vida útil y volumen, estos equipos suponen pérdidas de entre el 0,5-1% de la potencia de la lámpara. En lámparas con balastos electrónicos no son siempre necesarios pues algunos de estos balastos permiten la corrección del factor de potencia [8].

2.2.2. Electroluminiscencia.

La electroluminiscencia se basa en la conversión directa de energía eléctrica en luz de un material en respuesta a una corriente eléctrica o campo eléctrico que fluye a través de este. Un ejemplo de materiales que produzcan luz de esta forma son los diodos emisores de luz (Light Emitting Diodes, LEDs) [5].

2.2.2.1. Lámparas de estado sólido de diodos emisores de luz

La invención de los diodos emisores de luz se atribuye al científico ruso Losev [6], quien da detalles del primer diodo emisor de luz en una revista científica en 1.927 postulando que la luminiscencia no es el resultado de la incandescencia pero es debido a otro proceso similar “descarga electrónica fría” [6]. La evolución de los LEDs está documentada desde 1.962, cuando *General Electric*, desarrolla un diodo emisor de luz roja con eficiencia lumínica de 0,1 Lm/W. Para el año 2000 el desarrollo de estos LEDs rojos alcanza eficiencias de 100 Lm/W [6]. En 1.993 el profesor de la universidad de santa bárbara (USCB) Shuji Nakamura desarrolla el primer LED azul incorporando materiales inorgánicos en la estructura del semiconductor. Nakamura también desarrolla diodos emisores de luz verde y finalmente el primer diodo de luz blanca, incorporando una capa de fósforo sobre un LED azul. [6].

Materiales de Semiconductores y colores obtenidos		
Material del Semiconductor	Color	Longitud de onda (nm)
Arseniuro de galio (GaAs)	infrarrojo	940
Arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	rojo e infrarrojo	890
Fosfuro de galio aluminio (AlGaP)	verde	-
Fosfuro de aluminio-galio-indio (AlInGaP)	amarillo y naranja brillante	-
Fosfuro de galio-arsénico (GaAsP)	rojo, naranja y amarillo	630
Fosfuro de galio (GaP)	rojo, amarillo y verde	555
Nitrato de galio (GaN)	verde, verde esmeralda	525
Nitrato de indio-galio (InGaN)	azul, verde azulado	450
Zafiro (Al ₂ O ₃) como sustrato	azul	-
Silicona (Si) como sustrato	azul (en desarrollo)	-
Carburo de silicio (SiC)	azul	480

Tabla 4. Materiales empleados en semiconductores y colores reproducidos.

Un LED no posee filamentos como la lámpara de incandescente, que pueden romperse o quemarse, ni electrodos como las lámparas de descarga. Están fabricados con materiales semiconductores. Los primeros, se fabricaron en semiconductores de *arseniuro de galio* (GaAs) y *fosfuro de galio* (GaP). Los desarrollos recientes utilizan distintos componentes en los semiconductores como *fosfuro de aluminio indio y galio* (AlInGaP) o *nitrato de indio galio* (InGaN), dependiendo de la longitud de onda deseada y los colores a reproducir se utiliza cierta cantidad de cada elemento presente en la composición [5]. El color del LED se

especifica con su longitud de onda dominante. Si atendemos a esta composición, se puede obtener los colores que se presentan en la Tabla 4.

En concreto, un LED es un dispositivo construido mediante la unión de dos materiales semiconductores, uno de ellos con dopaje N (exceso de electrones) y otro con dopaje P (exceso de huecos). Al unir estos dos materiales se forma una barrera iónica donde no hay portadores libres y existe un intenso campo eléctrico (ver Figura 16a.). Si el diodo se polariza directamente una corriente de electrones fluirá desde la zona N a la zona P, disminuyendo la barrera iónica (ver Figura 16b.). Si se polariza inversamente no circula corriente y aumenta la barrera iónica (ver Figura 16c.). El diodo funciona como un interruptor que solo permite el paso de la corriente en una sola dirección denominada de sentido directo e impide la circulación de corriente en sentido inverso [4].

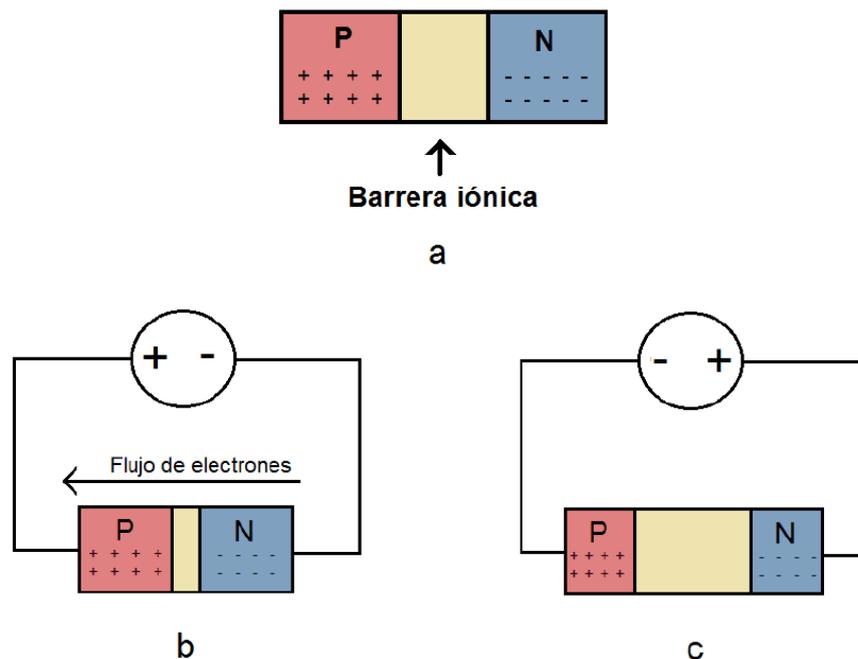


Figura 16. Diodos: a Unión P-N, b Polarización directa de la unión P-N, c Polarización inversa de la unión P-N [4].

Cuando el electrón pasa de la zona N a la zona P, el nivel energético es inferior, por lo que libera un fotón que lleva asociado una onda electro-magnética. Los diodos emisores de luz son diodos que emiten fotones dentro del espectro visible, de forma que podemos percibir la luz que irradian [4].

El LED está formada por una lente clara o difusa de resina epoxi que cubre el chip semiconductor y sella el LED en forma de capsula. Este además provee el control óptico de la luz emitida incrementando el flujo luminoso y reduciendo las reflexiones en la superficie del semiconductor logrando gran variedad de distribuciones angulares.

Los LEDs eran de poco eficiencia (0,1 lm/W) y solo se usaba como luz de señalización en los equipos electrónicos para por ejemplo señales de *stand-by*, *fallo*, etc. Con el paso de los años se ha evolucionado hacia LEDs de alto rendimiento, alcanzando altas eficacias luminosas de hasta 100 lm/W [6]. Gracias también a su bajo consumo se ha centrado el interés de estos en la producción de luz blanca para iluminación.

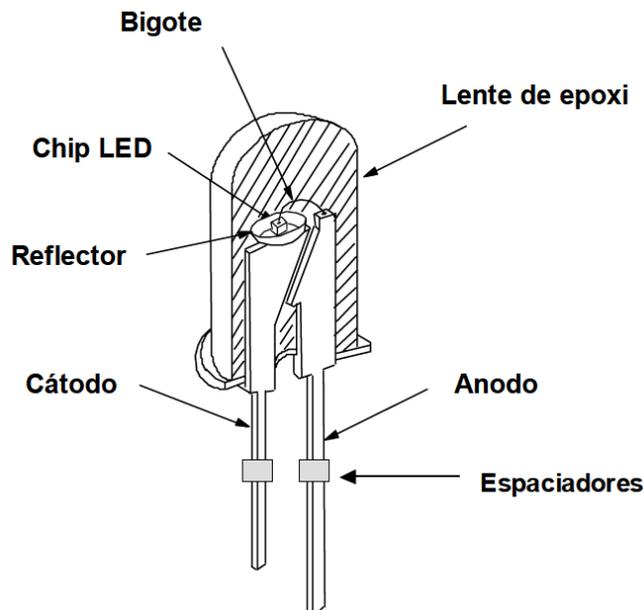


Figura 17. LED [5].

Estos LEDs de alta potencia requieren técnicas especiales para la producción de luz y hasta la fecha las tecnologías disponibles son [6]:

- Utilización de LEDs de azul-violeta que emiten radiación en la banda ultravioleta (UV) que pasa a través de un material compuesto de tierras raras. La fluorescencia de estos fósforos produce radiaciones en el espectro visible que genera luz blanca. De forma similar a la producción de luz en las lámparas incandescentes convencionales.
- Utilizando tres LEDs monocromáticos rojo, verde y azul (Red-Green-Blue, RGB). La mezcla de estas luces con la intensidad apropiada produce una luz blanca.

En términos globales las tecnologías actuales de SSLs-LEDs oscilan en el rango de 1 a 50 W, eficiencias luminosas de 20 a 93 Lm/W, temperatura del color de 5000 a 6000 K e índices de rendimiento del color de 70 a 80 [6].

Una lámpara LED, además de contar con un diodo como parte esencial, también requiere los siguientes componentes:

- *Lentes*: Su función es la de dispersar la luz.
- *Drivers*: Alimentan el LED con características de corriente y tensión adecuadas.
- *Disipadores de calor*: Evitan el calentamiento del LED o del driver.

De todos los componentes anteriores, los drivers junto con los propios LEDs serían los directamente relacionados con la conversión de la energía eléctrica en energía luminosa en la lámpara LED y serán explicados con detalle en el siguiente capítulo.

3. Circuito equivalente lámparas LED y forma de onda de la corriente consumida

Los sistemas de iluminación representan una gran parte del consumo eléctrico mundial. Así, la idea de promover mejoras en estos sistemas tiene como resultado el desarrollo de las lámparas de diodos emisores de luz (LED). En general, estas lámparas tienen una vida útil mayor, consumen mucho menos energía y son más respetuosas con el medio ambiente debido a la ausencia de mercurio en su interior [10], [11], [12]. La funcionalidad e implementación de los sistemas de iluminación LED también pasa por la necesidad de la regulación (o dimming) de los niveles de iluminación para adaptarlos a las necesidades de ahorro, normativas y confort de cada espacio. Los avances en los nuevos semiconductores muestran prometedores avances relacionados con estas características [28]. Esto hace que los LEDs se estén convirtiendo en una opción viable para reemplazar a los sistemas menos eficientes en aplicaciones de iluminación industrial y comercial [13].

Los aspectos técnicos a valorar en las lámparas LED (y por tanto en los circuitos electrónicos, o drivers, que permiten alimentar los LEDs con las características de corriente y tensión adecuadas) son su vida útil, eficiencia y métodos adecuados para mantener la temperatura y la tensión directa ya que el rendimiento lumínico del LED disminuye al aumentar su temperatura. Otro aspecto importante, al igual que en las lámparas fluorescentes compactas (CFLs), es la no linealidad de los convertidores AC/DC necesarios para suministrar alimentación continua al circuito electrónico, los cuales introducen corrientes altamente distorsionadas en la red eléctrica. Aun considerando que la potencia de una lámpara LED es baja, un número significativo de consumidores empleando lámparas LED y CFL puede producir problemas de calidad en la red de potencia [14].

En el capítulo anterior se describieron de forma general los sistemas de iluminación junto con los LEDs en cuanto a su funcionamiento, constitución y equipos auxiliares, ahora se realiza un análisis de los aspectos técnicos de los equipos auxiliares de alimentación (drivers de las lámparas LED) con el objeto de relacionar dichos aspectos con la forma de onda de la corriente que consumen las lámparas. Así, en el apartado 3.1 se analizarán los distintos circuitos que pueden tener los equipos auxiliares de alimentación de las lámparas y, en el apartado 3.2, se analizarán las formas de onda de las corrientes consumidas de la red de alterna por la lámpara en función de sus distintos circuitos de continua con el objetivo de definir su posible impacto armónico en la red.

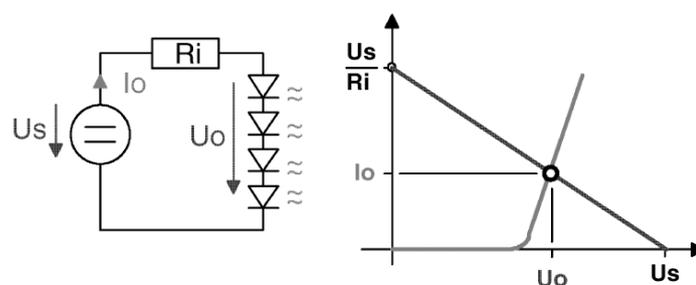


Figura 18. Corriente de una cadena de LEDs fijada por una resistencia serie y alimentada por una fuente de corriente continua. [15].

3.1. Circuitos de alimentación de las lámparas LED

Tal como se mencionó en el Capítulo II, los LEDs son componentes electrónicos de estado sólido desarrollados desde la década de los 60 y utilizados inicialmente como *señalizadores on/off* de pequeña potencia que trabajaban con tensiones y corrientes reducidas (ej. 1,5 V y 10 mA) [15] y por tanto podían ser alimentados simplemente a través de una resistencia con una fuente de continua, (Figura 18). En las última décadas, con el desarrollo de nuevos LEDs de mayores potencias (ej., LEDs de 1, 3 o 5 W) se ha abierto la posibilidad de su utilización en aplicaciones relacionadas con la iluminación donde son conectados en serie formando cadenas (strings o arrays) de LEDs que constituyen lámparas de estado sólido de diodos emisores de luz (Solid State Lamps SSL o Light Emitting Diodes LEDs) cuya potencia es similar a las CFLs. Por tanto, las cadenas de LEDs pueden llegar a consumir corrientes nominales de hasta 350mA o superiores y con un salto de tensión directa de 3V [15]. Estas cadenas de LEDs pueden tener configuraciones distintas (serie, paralelo y serie-paralelo) y su circuito de alimentación en continua no es tan simple como el presentado en la Figura 18 ya que la lámpara que deben conformar se conecta a la red de alterna (habitualmente 220-240V AC 50/60 Hz) y además dichas cadenas se deben alimentar con una corriente constante controlable relativamente elevada (corrientes desde 350mA hasta 1A aproximadamente) en comparación con sus aplicaciones originales de señalización independientemente de las variaciones de la tensión que podría dar lugar a variaciones en la intensidad luminosa [11]. Por otro lado, se deben de minimizar las pérdidas en la lámpara para conseguir su máxima eficiencia lo que lleva a la utilización de fuentes conmutadas para el control de la corriente. La utilización de fuentes conmutadas de alta frecuencia permite reducir las pérdidas en las resistencias de los circuitos de control y reducir el tamaño de algunos de sus componentes. Por los motivos anteriores, el circuito típico de las lámparas de LEDs está generalmente constituido por un filtro EMI (filtro de interferencias electromagnéticas) para eliminar las tensiones y corrientes espurias debidas a las conmutaciones de la electrónica interna de la lámpara, un rectificador que alimenta un condensador electrolítico de filtrado y un convertidor controlado que actúa como fuente de corriente constante (FCC) de la cadena de LEDs (Figura 19). Este último elemento constituye un conjunto equivalente al balasto de las CFLs cuyo objetivo sería alimentar los LEDs con una corriente continua constante a partir de la tensión de alimentación alterna de la red.

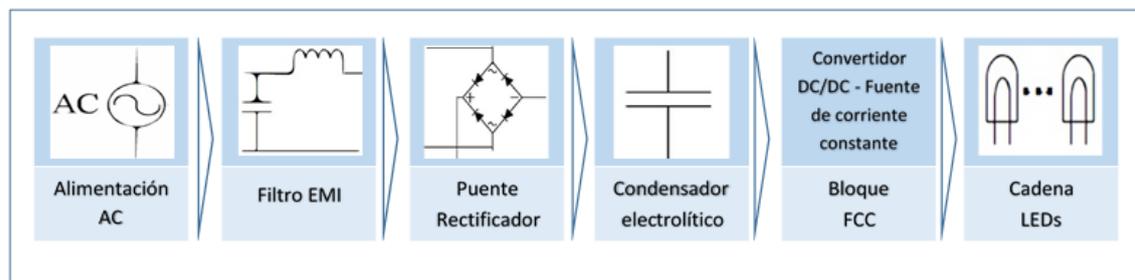


Figura 19. Diagrama de circuito electrónico básico de alimentación de lámparas LED.

Como se verá en el siguiente apartado, los bloques correspondientes al condensador electrolítico y la fuente de corriente admiten diferentes configuraciones que van de las más básicas y elementales a aquellas que persiguen principalmente mejorar la eficiencia de la conversión y la vida útil del equipo electrónico. Por otro lado, la configuración anterior, tal como ya se ha comentado, presenta una corriente consumida altamente distorsionada

inherente al funcionamiento del puente rectificador por lo que existen mejoras sobre el circuito de la Figura 19 mediante convertidores correctores del factor de potencia (FdP o Power Factor Correction PFC) que se suelen conectar antes de la rectificación o antes de la fuente de corriente o incluso constituyendo un único convertidor (Figura 20). La utilización de esta etapa PFC permite obtener la máxima eficiencia luminosa y hacer un mejor uso de su característica eléctrica mejorando tanto el factor de desplazamiento de la corriente como su contenido armónico.

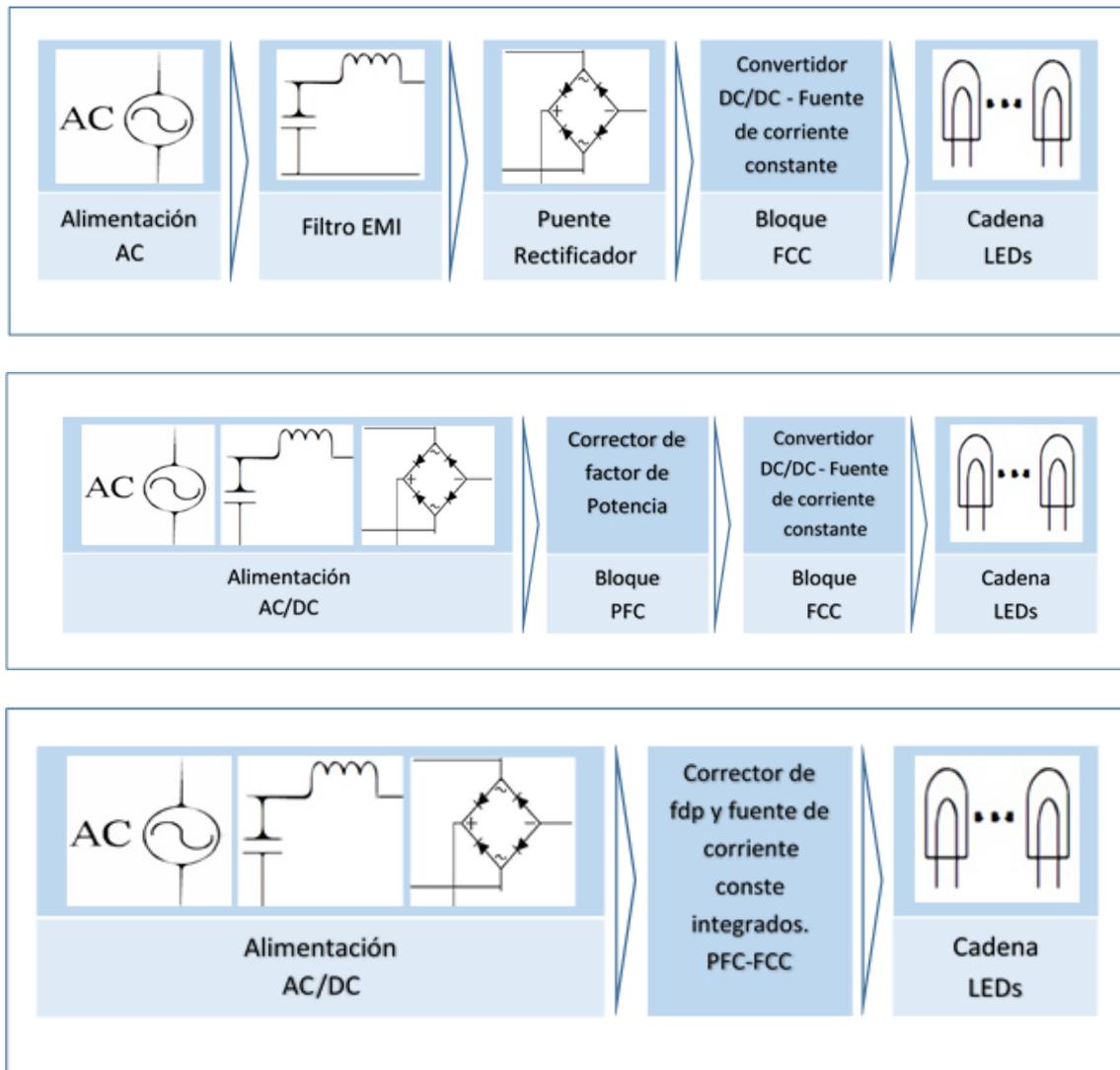


Figura 20. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con corrección de factor de potencia (PFC). Arriba: PFC antes de la etapa de rectificación. Centro: PFC antes de la fuente de corriente constante. Abajo: PFC integrado con la fuente de corriente constante.

Respecto a los avances alcanzados con las nuevas configuraciones de los balastos y convertidores en relación con la reducción del contenido armónico de la corriente hay que comentar que, en general, las Normas limitan la emisión de armónicos para equipos de iluminación con corrientes de alimentación $\leq 16A$ por fase y potencias superiores a los 25 W por lo que los dispositivos de corrección de factor de potencia solo son utilizados de forma obligatoria en dicho tipo de lámparas. El resto pueden incorporarlo en su circuito o no dependiendo de los fabricantes.

Tal como se ha comentado en la introducción, es habitual en los sistemas de iluminación la utilización de “dimmers” para regular la luz proporcionada por las lámparas, siendo otro aspecto importante en las lámparas LED. Esta característica da la posibilidad de que los equipos de iluminación se ajusten en función de las necesidades de visión, comodidad, demanda o eficiencia. La utilización de estos reguladores ha obligado a modificar los convertidores de las etapas de continua de las lámparas para que funcionen correctamente y por ello existen lámparas LEDs específicamente diseñadas para poder utilizar dispositivos de regulación.

El circuito de la lámpara con la inclusión de los sistemas dimmer tiene una estructura similar a las lámparas LED estándar. Está constituido por un filtro EMI, el control del dimmer, un rectificador que alimenta un condensador electrolítico de filtrado y un convertidor controlado que actúa como fuente de corriente constante de la cadena de LEDs y el cual puede ser mejorado con un corrector de factor de potencia (Figura 21).

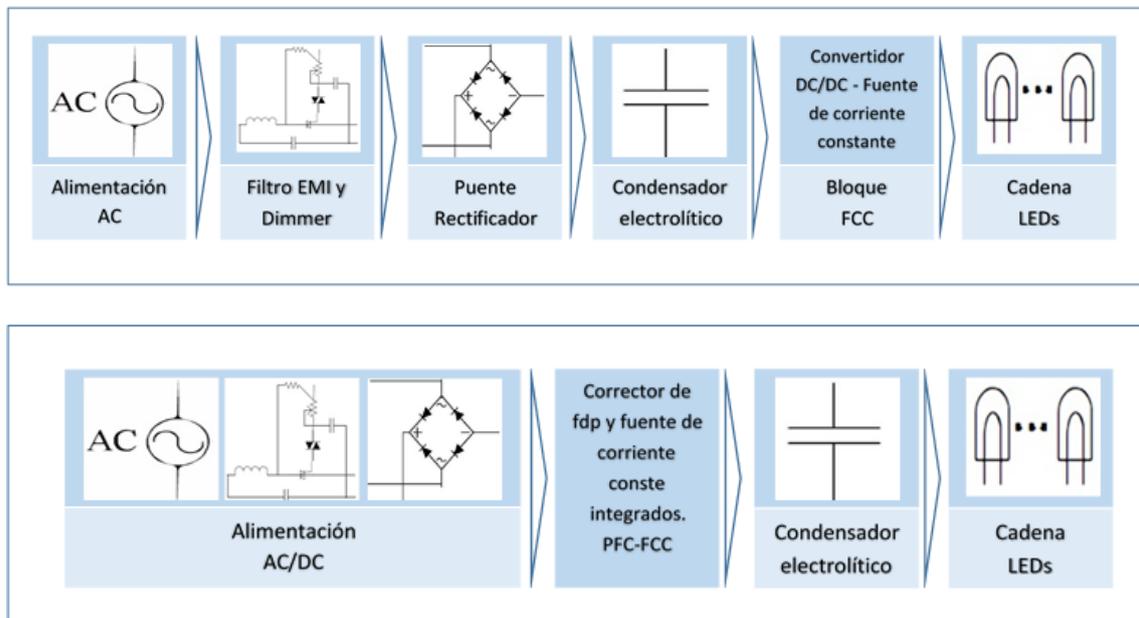


Figura 21. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con regulación de la iluminación. Arriba: Circuito básico. Abajo: Circuito con corrección del factor de potencia integrado.

A continuación, se verán los distintos circuitos que pueden presentar las etapas de continua de la lámpara diferenciando entre las lámparas no regulables y regulables, es decir los convertidores que actúan como fuentes de corriente así como sus variantes y las modificaciones de esos circuitos para mejorar las prestaciones de la lámpara.

3.1.1. Circuitos electrónicos de lámparas LED no regulables

Se presentan en este apartado los circuitos electrónicos que configuran la fuente de corriente constante que alimenta los LEDs no regulables. Se pueden distinguir dos tipos de circuitos: Aquellos que no disponen de mejora del factor de potencia y que denominaremos básicos (ver Figura 19) y aquellos que si la tienen (ver Figura 20).

3.1.1.1. Circuitos electrónicos básicos

Dentro de los circuitos básicos se pueden distinguir aquellos que presentan configuraciones estándar basadas en las fuentes de alimentación DC/DC tradicionales y aquellas que introducen una serie de mejoras a las configuraciones anteriores con el objeto de optimizar su diseño.

Configuraciones estándar

Los circuitos estándar más sencillos de los convertidores de la etapa de continua de las lámparas LED se basan en las fuentes de alimentación DC/DC tradicionales cuyo control de la tensión de salida se ha modificado (o sustituido) por un control de la corriente de salida, es decir la corriente que consumen los LEDs. Este control tiene como objetivo estabilizar el valor medio de la corriente de salida pulsante con el fin de que la corriente consumida por los LEDs sea constante con independencia de las variaciones de la tensión de entrada. Para ello, en general, el control se realiza añadiendo una resistencia serie en algún punto del circuito (frecuentemente en serie con los LEDs) con el objeto de poder medir la corriente que consumen los LEDs, comparar esa medida con una corriente de referencia que interesa circule por dichos LEDs y utilizar esa comparación para controlar los semiconductores de potencia y conseguir el objetivo propuesto. A partir del objetivo anterior se distinguen dos tipos de configuraciones básicas, aquellas que no tienen aislamiento galvánico entre la alimentación y los LEDs y aquellos que si presentan aislamiento galvánico. A continuación se presentarán ambas configuraciones.

➤ **Configuraciones estándar y sin aislamiento galvánico**

Como introducción, se pueden distinguir los siguientes tipos de drivers para el control de los LEDs.

- a) **Controles LED Lineales:** De forma similar al esquema presentado en la Figura 18 los controles LED lineales son los más simples y carecen de elementos magnéticos. Su implementación es sencilla a partir de la utilización de reguladores de tensión configurados como fuentes de corriente lineales (ver Figura 22). Este control emplea una resistencia de medida para la corriente y un voltaje de referencia en un lazo de realimentación para controlar la salida de corriente [16].

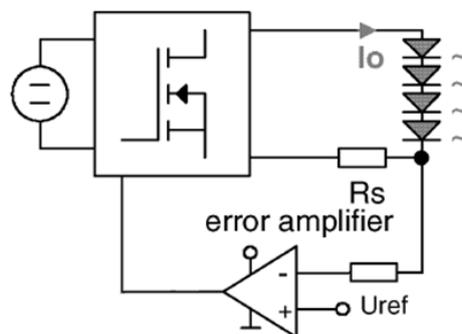


Figura 22. Esquema de control lineal de lámparas LED.

Las principales ventajas de esta topología son el reducido número de elementos y el bajo coste. Los inconvenientes son las pérdidas por efecto joule que los limitan a sistemas de baja potencia [16].

- b) **Controles LED por histéresis:** Los controles por histéresis funcionan como fuentes de corriente continua conmutadas similares a los controles lineales, pero emplean inductancias en su funcionamiento (ver Figura 23). Entre las cualidades de este circuito están baja disipación de potencia que aumenta su eficiencia y viabilidad para el control de cargas LED elevadas con pérdidas inferiores.

Su coste es mayor en comparación con los sistemas lineales debido a la necesidad de un conmutador de potencia, un diodo de amortiguación y una elevada inductancia para almacenar energía durante la conmutación [16].

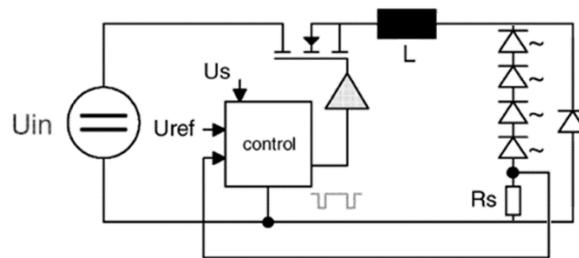


Figura 23. Esquema de control por histéresis de lámparas LED.

- c) **Controles LED conmutados:** Los drivers conmutados son más eficientes y flexibles que los sistemas lineales. Sin embargo pueden provocar perturbaciones eléctricas de alta frecuencia tanto radiadas como conducidas y su diseño tiene mayor complejidad. Generalmente cuando la tensión de entrada del rectificador es inferior a la que necesitan los LEDs se debe usar este tipo de control [17]. La selección entre controles lineales o conmutados se decide por simplicidad, potencia y eficiencia [16], estos últimos sistemas se verán con más detalle a continuación por ser los más utilizados.

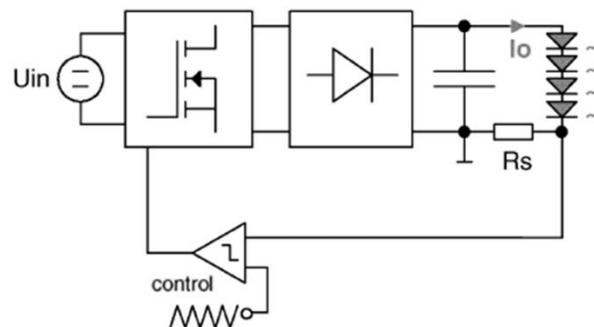


Figura 24. Esquema de control conmutado para lámparas LED.

Los circuitos conmutados con configuraciones estándar sin aislamiento galvánico más utilizados como drivers de las lámparas LED son los convertidores *buck*, *boost* y *buck-boost* tradicionalmente utilizados en todo tipo de aplicaciones electrónicas. Estos convertidores son típicamente diseñados para estabilizar su voltaje a la salida, mientras que los LEDs requieren una corriente de salida establecida. Es por ello que se modifican los circuitos

tradicionales añadiendo una resistencia R_s en serie a los LEDs de forma que la corriente puede ser medida mediante la tensión de dicha resistencia y utilizada para controlar la conmutación del semiconductor de potencia con el objetivo de mantener la corriente que circula por los LEDs constante e igual a un valor de referencia predeterminado. Todo lo anterior conduce al uso de topologías de convertidor *buck*, *boost* y *buck-boost*, que se muestran a continuación en la Figura 25 [15]. Estos convertidores por su simplicidad y bajo coste son una alternativa considerable para controles LED.

En el caso de los convertidores buck o convertidor reductor [12], Figura 25 Arriba, el circuito es sencillo y según que aplicación resulta una solución eficiente, de reducido tamaño y coste. Los inconvenientes que puede presentar son la necesidad de capacidades elevadas en el condensador de suavizado (después del puente rectificador), necesario para reducir el rizado de corriente y que puede encarecer el coste del circuito [16].

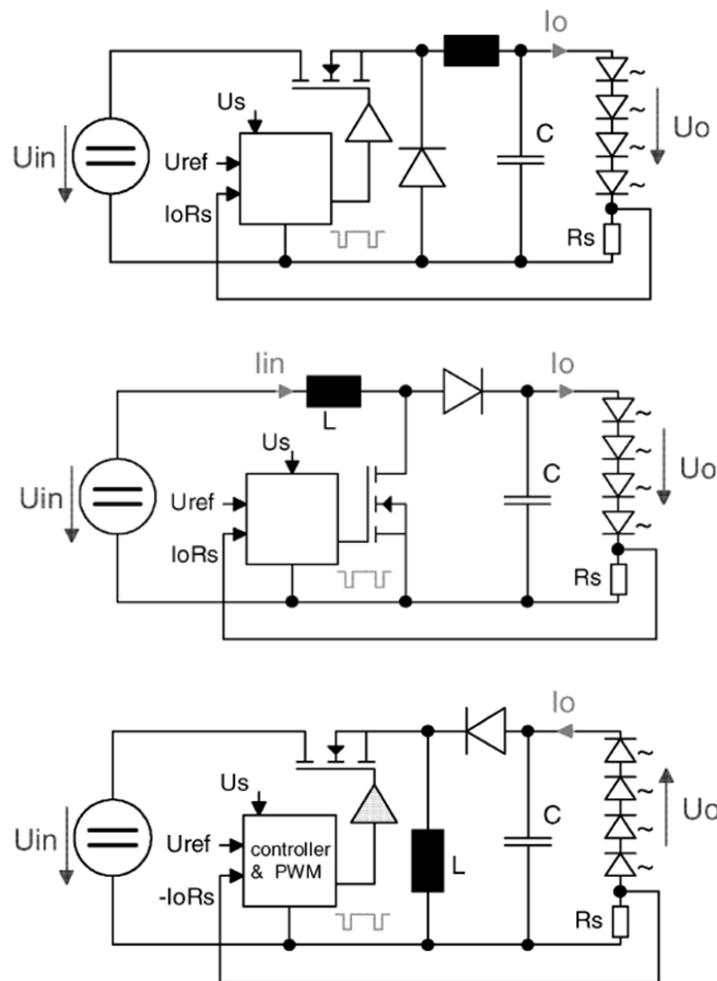


Figura 25. Circuitos estándar conmutados y sin aislamiento galvánico de control de lámparas LED. Arriba: Convertidor Buck. Centro: convertidor Boost. Abajo: Convertidor Buck-boost [15].

En aplicaciones donde es necesaria una tensión mayor a la salida que la disponible en la entrada, se utiliza el convertidor boost o convertidor elevador [18], Figura 25 Centro. El funcionamiento de este convertidor es similar al buck pero los componentes están dispuestos de forma distinta lo que permita elevar la tensión de salida a valores mayores que los de la entrada. Esto hace que este tipo de convertidor sea útil en sistemas de iluminación donde la tensión de la cadena de LEDs excede la tensión del sistema. El

convertidor boost en términos de eficiencia y coste es similar al buck, puede presentar ruido y respuesta transitoria lenta pero puede optimizarse a expensas de elevar su coste [16].

El convertidor buck-boost, Figura 25 Abajo, tiene la característica de reducir o elevar la tensión pudiéndose adaptar a un mayor rango de aplicaciones en función de la tensión de salida [19]. Existen en la literatura distintas variantes de las configuraciones anteriores [12], [18], [20] pero todas ellas se pueden agruparse en los circuitos presentados en la Figura 25.

➤ **Configuraciones estándar y con aislamiento galvánico**

La alimentación de la cadena de LEDs también es habitual realizarla mediante convertidores con aislamiento galvánico que permiten desacoplar la alimentación de la carga. Los convertidores con aislamiento galvánico más habituales son los convertidores *flyback* (o *push-pull*), *forward* y *resonantes*.

La Figura 26 muestra un ejemplo esquemático de los dos primeros. Tal como se observa en la figura, en estos casos la comparación de la tensión de referencia para el control de la corriente de salida, U_{ref} , y la tensión medida en la resistencia serie, $R_s \cdot I_o$, se realiza en el secundario para evitar la amplificación del error, mientras que el control está en el primario. Ambas partes del control son conectadas mediante un opto acoplador. Estos circuitos son más complejos que los no aislados galvánicamente, presentando mayor complejidad del control y regulación de la corriente. [15].

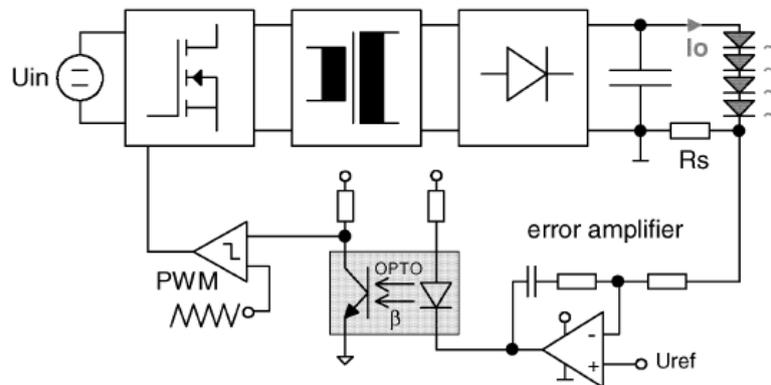


Figura 26. Esquema de control con aislamiento galvánico para lámparas LED. [15].

El convertidor flyback (Figura 27) se basa en el principio de funcionamiento del convertidor boost. Este utiliza un interruptor MOSFET y una inductancia para suministrar energía almacenada y transferirla a un secundario aislado y a un diodo rectificador.

El mayor inconveniente de los convertidores flyback es el bajo rendimiento del transformador, el cual almacena la energía durante cierto tiempo como una inductancia. Frente al inconveniente anterior, el convertidor forward (Figura 28) es una versión aislada del convertidor buck que resulta más eficiente en la transferencia de energía a la carga.

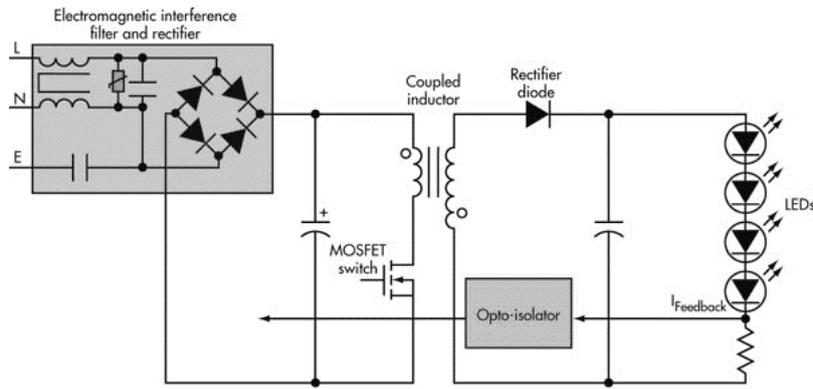


Figura 27. Convertidor flyback para alimentación de lámparas LED.

Hay que mencionar que el convertidor de la Figura 28 se han hecho algunas modificaciones al circuito buck tradicional, entre las que está la sustitución de la inductancia típica a su salida por un condensador, con el objeto de mejorar sus prestaciones.

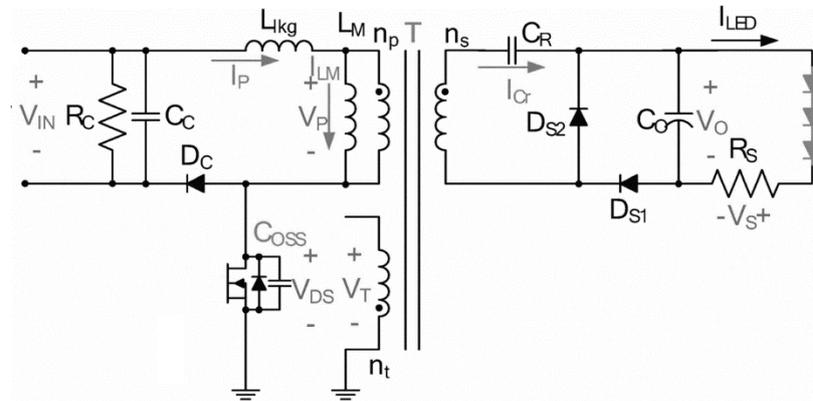


Figura 28. Convertidor forward para alimentación de lámparas LED. [21].

Dentro de la familia de los circuitos con aislamiento galvánico, en los últimos años, se han revelado como configuraciones interesantes para las aplicaciones en lámparas LEDs las topologías estándar de convertidores *resonantes* debido a sus prestaciones de potencia, sus bajas pérdidas de conmutación y su reducida contribución de armónicos de alta frecuencia [15]. En la Figura 30 se muestra un controlador de este tipo.

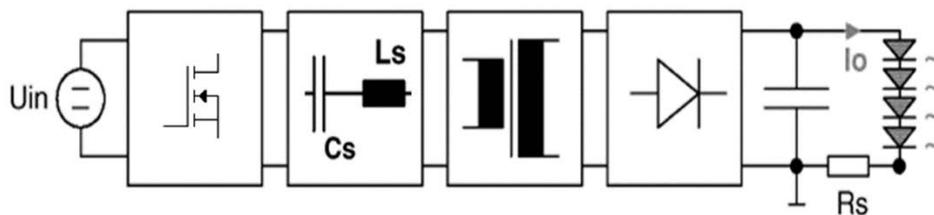


Figura 29. Esquema de control resonante para lámparas LED.

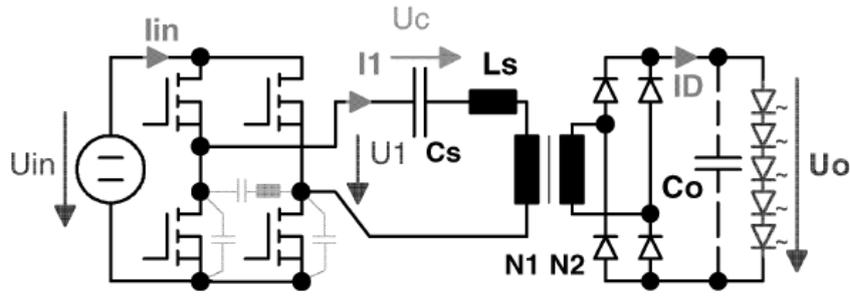


Figura 30. Convertidor resonante para lámparas LEDs. [15].

Los controladores resonantes presentan la ventaja adicional de ser convertidores tensión-corriente que no necesitan sensores de corriente para estabilizar el valor medio de la corriente de salida con independencia de las variaciones de la tensión de la carga U_o y dentro de un rango de dicha tensión. Así, el valor medio de la corriente que circula por los LEDs tiene la expresión:

$$\bar{I}_D = \frac{U_{in}}{Z_{Res}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{N1}{N2} \cdot \frac{f_s}{f_{Res}}$$

Donde:

I_D : Corriente media (A).

U_{in} : Tensión de entrada (V).

Z_{Res} : Impedancia de resonancia (Ω):

$$Z_{Res} = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$$

$N1/N2$: Relación de espiras de bobinados.

f_s : Frecuencia de conmutación (Hz).

f_{Res} : Frecuencia de resonancia (Hz):

$$f_{Res} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_s \cdot C_s}}$$

Para un rango de tensiones:

$$\frac{1}{3} \cdot U_{in} < U_o \cdot \frac{N1}{N2} < U_{in}$$

En la expresión de la corriente I_D se observa que, dentro del rango de U_o indicado, la corriente consumida por los LEDs es independiente del valor de la tensión U_o y por tanto no necesita ser controlada. Además, se puede ver que también es independiente del

condensador de filtrado C_o a la salida del driver y que puede ser regulada con la frecuencia de conmutación f_s dentro del rango $0 < f_s \leq 1/2 \cdot f_{res}$.

Configuraciones mejoradas

Es posible plantear las mejoras de los circuitos estándar que se presentan a continuación considerando las siguientes características especiales de los LEDs y sus aplicaciones:

- Los controladores de las lámparas LED están sujetos a requerimiento de bajo coste y por tanto los costes de los componentes deben ser reducidos.
- Los LEDs muestran gran rapidez de respuesta a la corriente por lo que es posible alimentarlos por corrientes pulsantes de elevada frecuencia sin que ello afecte a su luminosidad ni color.
- Otra característica importante de los LEDs es su larga vida por tanto los controladores de LED electrónicos deben ser diseñados con una vida útil similar, es decir deben utilizar componentes electrónicos de larga vida útil.

El primer y tercer requisitos pueden ser posibles si se suprimen los condensadores electrolíticos típicos usados en las etapas de rectificación y en las etapas de salida de las fuentes de alimentación conmutadas ya que puede reducir la vida del controlador, especialmente si está localizado en ambientes con altas temperaturas, y su presencia encarece los costes del equipo. Por este motivo, las configuraciones mejoradas tienden a eliminar dichos condensadores de sus circuitos (ver Figura 31). Al suprimirlos, la corriente que circula por los LEDs deja de ser constante y se convierte en pulsante cuadrada, triangular o sinusoidal dependiendo de la topología del controlador y de su esquema de control [15].

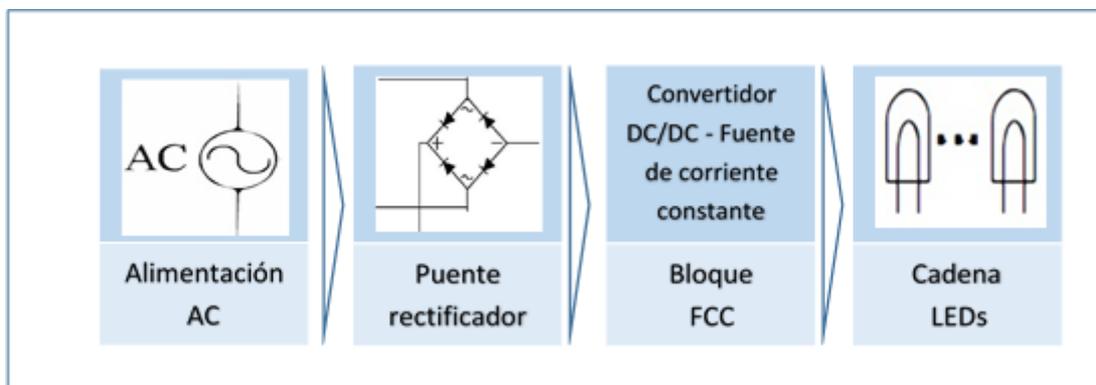


Figura 31. Diagrama de circuito electrónico mejorado de alimentación de lámparas LED.

Otro tipo de mejoras incorporan una etapa de mejora más sofisticada denominada convertidor de potencia (Power Converter, PC [22]) con el objeto de eliminar los condensadores electrolíticos evitando un elevado rizado en la alimentación de los LEDs. Esta etapa suele estar constituida por interruptores conmutados controlados a alta frecuencia distintos a los utilizados por la fuente de corriente controlada o compartidos con ellas en un intento de reducir los interruptores activos del circuito (ver Figura 32).

A continuación se presentan, algunos ejemplos de los circuitos con y sin aislamiento galvánico mejorados eliminando el condensador electrolítico [15].

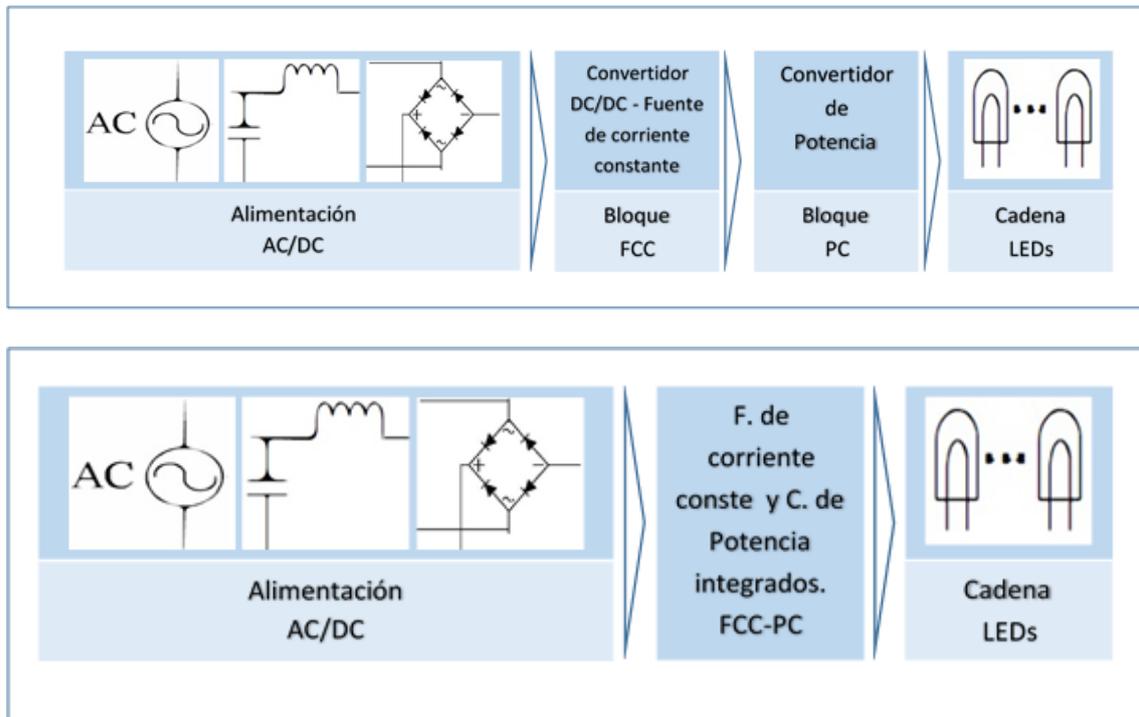


Figura 32. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con convertidor de potencia. Arriba: PC entre FCC y carga. Abajo: FCC y PC integrados.

➤ **Circuitos con configuraciones mejoradas y sin aislamiento galvánico**

En el caso de los circuitos sin aislamiento galvánico, tal como se puede observar en la Figura 33, se suprime el condensador electrolítico de la salida de los convertidores estándar DC/DC de la Figura 25 simplificando el circuito.

En el caso del convertidor buck la corriente consumida por los LEDs es una onda triangular con componente de continua [15]. En los convertidores boost y buck-boost, los LEDs están alimentada por una corriente casi cuadrada si el valor de la inductancia de choque L es lo suficientemente grande. El carácter pulsante de la corriente que sale del circuito mejorado y alimenta los LEDs supone que su control sea más difícil que en el caso de los circuitos estándar y por tanto los circuitos con configuraciones mejoradas deban tener controles más avanzados.

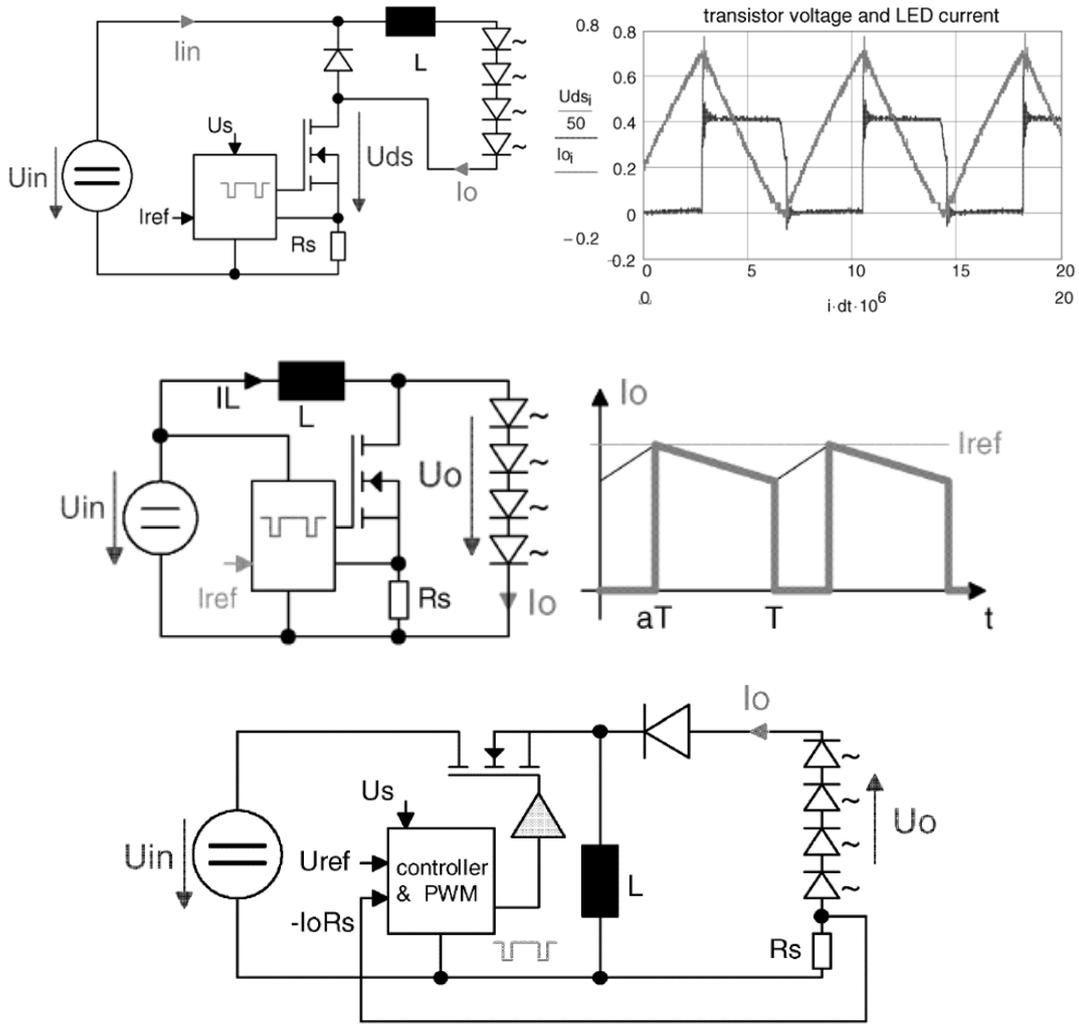


Figura 33. Convertidores básicos mejorados. Arriba: Convertidor Buck y corriente de salida. Centro: convertidor Boost y corriente de salida. Abajo: Convertidor Buck-boost [15].

➤ **Circuitos con configuraciones mejoradas y con aislamiento galvánico**

De forma similar a las configuraciones anteriores, en el caso de topologías con aislamiento galvánico la mejora del circuito también consiste en suprimir el condensador electrolítico a la salida del convertidor y alimentar los LEDs directamente por el devanado del secundario.

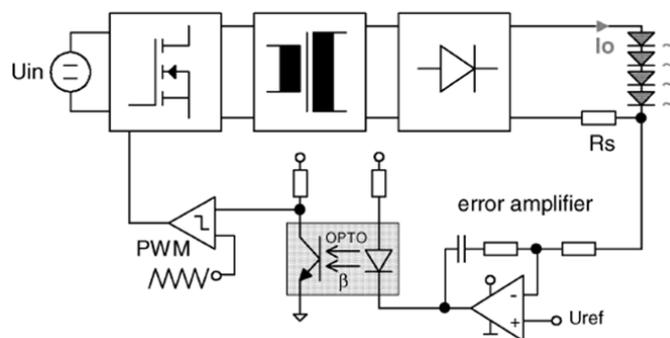


Figura 34. Esquema de convertidor aislado mejorado.

La Figura 35 muestra la configuración mejorada de los convertidores flyback. Esta configuración presenta las siguientes desventajas:

- El valor medio de la corriente de salida depende del número de LEDs conectados en serie.
- La reactancia de dispersión (leakage reactance) del transformador L_s requiere circuito *snubber* y produce pérdidas adicionales (ej. en U_z).
- La forma de onda de la corriente en la cadena de LEDs causa problemas de interferencias electromagnéticas (Electro Magnetic Interference EMI).

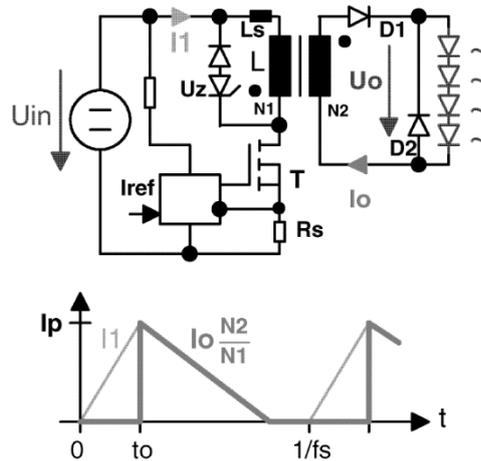


Figura 35. Convertidor flyback sin condensador electrolítico [15].

Las configuraciones mejoradas de los convertidores resonantes serían iguales la presentada en la Figura 30 pero eliminando el condensador de filtrado C_o a la salida del driver.

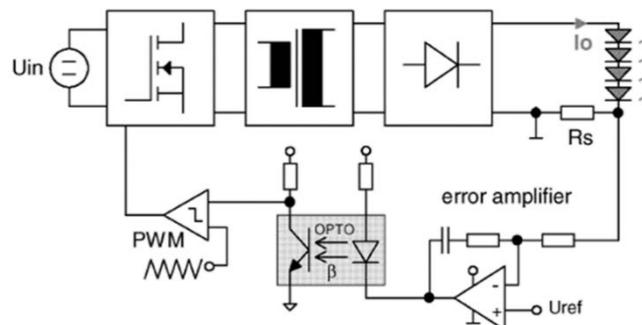


Figura 36. Esquema de convertidor resonante sin condensador electrolítico.

3.1.1.2. Circuitos electrónicos con factor de potencia mejorado

Ya se ha comentado que el uso de convertidores AC/DC para ajustar la tensión de los convertidores DC/DC que alimentan los LEDs introduce no linealidades en el sistema y por ello las lámparas LED consumen corrientes distorsionadas. Aunque la potencia nominal de las lámparas LED no es elevada, la agrupación de las mismas puede llevar a contaminar las tensiones y corrientes de las instalaciones eléctricas. En este sentido, las lámparas LED deben cumplir con directivas que limitan la distorsión armónica y sus corrientes consumidas. En particular, la norma UNE-EN-IEC 61000-3-2 (IEC 61000-3-2: CEM. Parte 3-

2: Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)) establece los estándares y fija los límites para equipos de corriente de entrada ≤ 16 por fase [13]. La Norma distingue los siguientes tipos de equipos:

- **Clase A:** Equipos trifásicos equilibrados; aparatos domésticos excluyendo los clase D; herramientas (no portátiles); reguladores para lámparas incandescentes; equipos de audio; cualquier otro no incluido en las demás clases.
- **Clase B:** Herramientas de potencia portátiles.
- **Clase C:** Equipos de iluminación de más de 25 W.
- **Clase D:** Monofásicos, bajo 600 W, PCs, monitores de PCs, receptores TV ...

Y fija los siguientes límites para las corrientes armónicas que consumen:

3-2			
k	A	C	D
	$I_k(A)$	$HD_{ik}(\%)$	$I_k(A)$
3	2,3	$30 \cdot \lambda$	2,3
5	1,14	10	1,14
7	0,77	7	0,77
9	0,4	5	0,44
11	0,33	3	0,33
13	0,21		0,21
15, 21 ...	$0,15 \cdot (15/k)$		0,15·(15/k)
17, 19 ...			

Notas: - λ es el factor de potencia del circuito (3-2, Clase C).

Tabla 5 Especificaciones norma - UNE-EN-IEC 61000-3-2. Límites para las emisiones de corriente armónica.

Se observa que la norma no impone ninguna limitación para los equipos de iluminación de potencia menor de 25 W mientras que para aquellas cuya potencia es superior a 25 W sí que fija unos límites en la distorsión armónica individual de la corriente, $HD_{ik} = I_k/I_1$. Según lo anterior, los convertidores con corrección del factor de potencia solo son utilizados de forma obligatoria en el último tipo de las lámparas de descarga mientras que las primeras pueden incorporarlo en su circuito o no dependiendo de los fabricantes aunque lo habitual es que no lo tengan pues encarece innecesariamente el coste de la lámpara.

Los circuitos correctores del factor de potencia que se incorporan a las lámparas LED se pueden dividir en dos grandes familias: filtros pasivos, y filtros activos. A continuación se describirán estos sistemas de filtrado.

Circuitos con filtros pasivos

Una forma de mejorar el factor de potencia del balasto y reducir el contenido de armónicos es mediante el uso de un filtro pasivo. En general, los filtros pasivos son una serie de circuitos conformados por inductancias y condensadores (elementos pasivos) ajustados para presentar altas o bajas impedancias a determinadas frecuencias según se las desee filtrar o no. Las ventajas de las técnicas de filtrado LC es la simplicidad y su fácil implementación, pero su mayor desventaja son el tamaño y peso que hacen que sea un

método poco atractivo para las expectativas deseadas para la iluminación LED debidas a la limitación de espacio y posibles pérdidas de potencia [23] Otro inconveniente de este sistema es que rara vez consigue obtener valores de distorsión armónica total muy reducidos [24] [19]. Hay distintos tipos de filtros pasivos, cuanto mejor sean dichos filtros se obtendrá una onda de corriente consumida mejor y con menos distorsión armónica, pero con un coste mayor. Estos filtros pueden localizarse a la entrada del rectificador AC/DC o asociados al driver de los LEDs. A continuación se presentan diferentes ejemplos de dichos filtros.

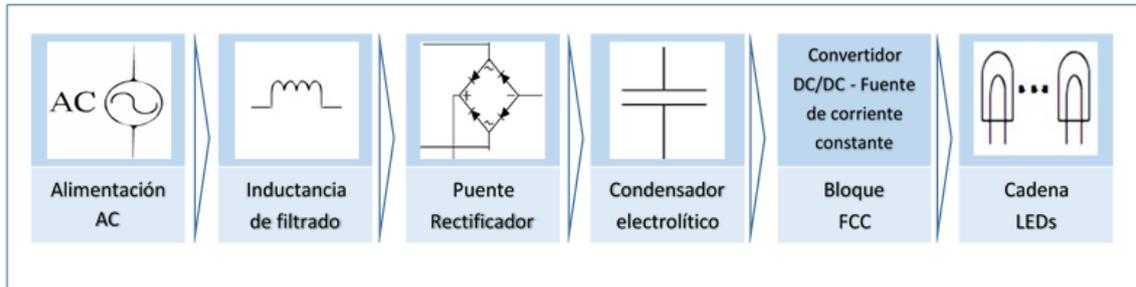


Figura 37. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con filtro inductivo en lado AC.

Figura 37. Utilización de inductancia en el lado de AC en conjunto con el puente rectificador [19].

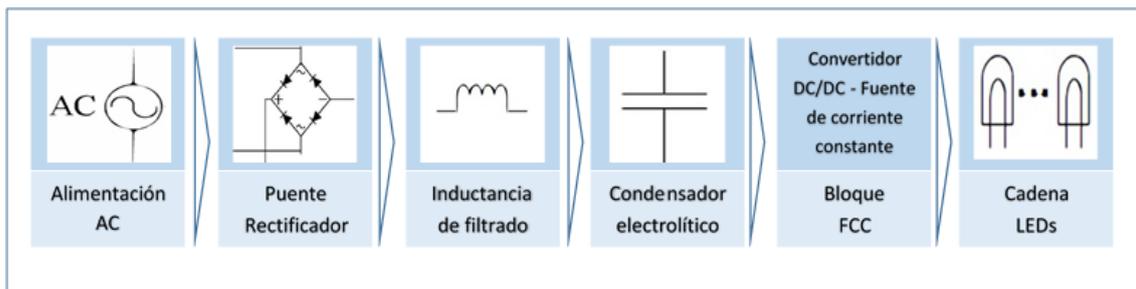


Figura 38. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con filtro inductivo en lado DC.

La utilización de la inductancia también puede hacerse en el lado DC como se muestra en la Figura 38. También es posible mejorar la forma de la corriente utilizando combinaciones de filtro paso bajo de entrada o salida (ver Figura 39), basados en circuitos resonantes LC [19].

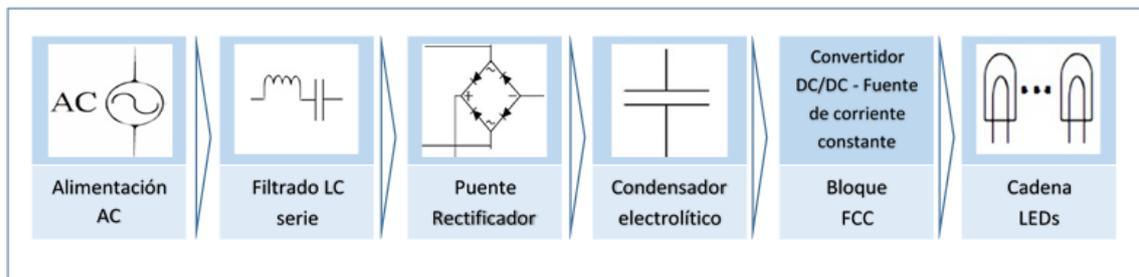


Figura 39. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con filtrado LC serie.

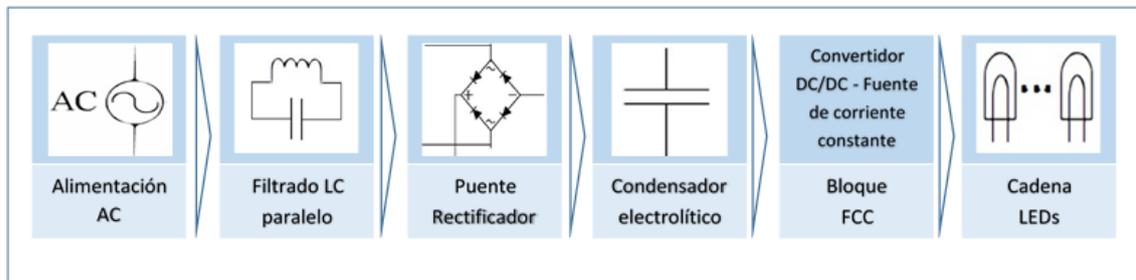


Figura 40. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con filtrado LC paralelo.

El esquema de la Figura 40 utiliza un filtrado de eliminación de banda paralelo de tipo resonante, se puede ajustar para filtrar armónicos determinados.

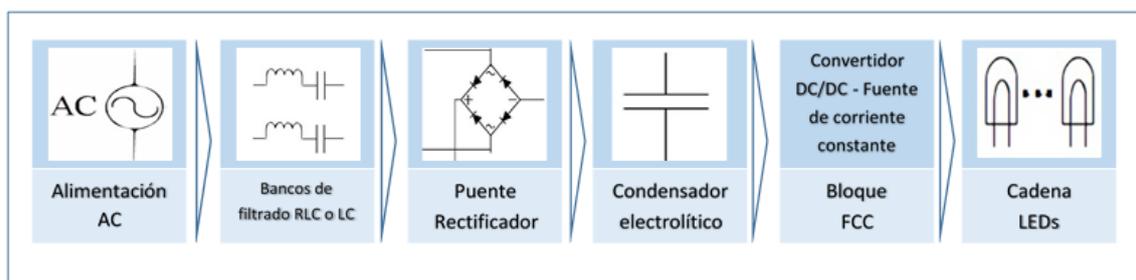


Figura 41. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con banco de filtros LC/RLC serie.

Otros sistema utilizado son bancos de filtrado, conectados en paralelo con la alimentación AC y ajustados al componente armónico a atenuar (ver Figura 41). Puede combinarse con otros sistemas pasivos y aunque se mejora la corriente de línea aumenta la complejidad del circuito. La Figura 42 presenta el filtrado LCD mediante diodo, inductancia y condensador serie. Los elementos reactivos añadidos tienen valores relativamente bajos. El circuito cambia la forma de la corriente de entrada, mientras que sólo se puede conseguir una reducción limitada de las corrientes armónicas [19].

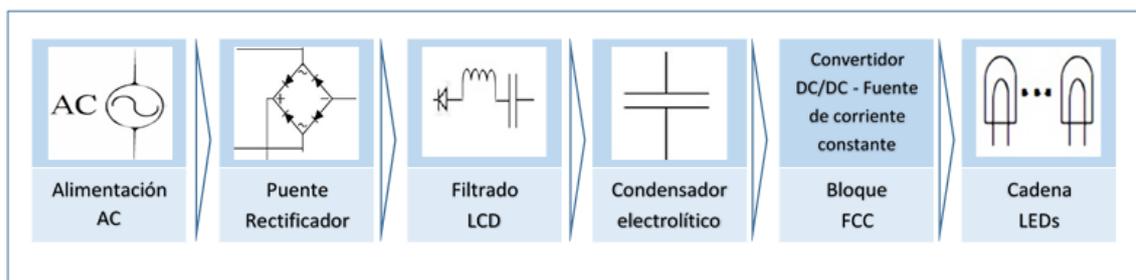


Figura 42. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con filtrado LDC.

En la Figura 43 se muestra el circuito buck (Figura 25) con un filtro pasivo variante del LDC a la salida del rectificador cuyo objetivo es limitar los armónicos y mejorar el factor de potencia.

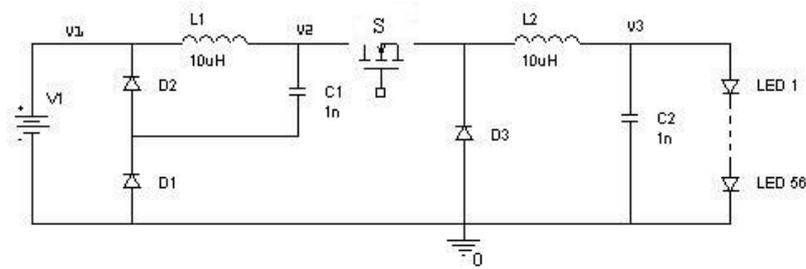


Figura 43. Control de lámparas LED con filtro pasivo (convertidor buck) [25].

Dentro de los sistemas pasivos además de circuitos tipo L en AC y DC, LC , RLC o LCD (Figura 37 a Figura 42) existe la configuración valley-fill o equivalentes. Este es un sistema pasivo muy habitual donde el condensador de filtrado a continuación del puente de diodos rectificador es partido en dos condensadores distintos que son cargados alternativamente por medio de tres diodos (ver Figura 44). En la figura el control LED pasivo está conformado por un filtro pasivo a la entrada (inductancia L_s), un puente rectificador de diodos, el circuito valley-fill y una inductancia de salida (en general esta inductancia podría ser cualquiera de los circuitos vistos en el apartado de convertidores estándar) y la carga de LEDs [10].

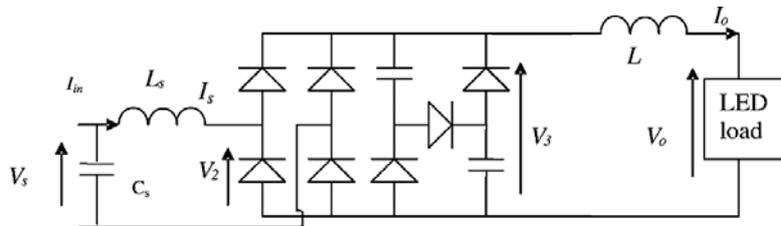


Figura 44. Control de lámparas LED pasivo con filtro valley-fill [10].

El circuito Valley-fill tiene un rizado de la tensión DC alto, produciendo fluctuación de luminosidad y potencia de la lámpara y como resultado se reduce la vida útil de la lámpara. Para mejorar estos aspectos se utilizan dos pequeños condensadores iguales en capacidad como divisores de tensión (ver Figura 45) para mejorar la forma de onda de la corriente cerca del punto de intercambio (entre el puente rectificador y valley-fill). También es posible conectar una resistencia a la parte inferior de uno de los condensadores a fin de eliminar los picos de corriente de carga en el pico de tensión. Esta es una manera rentable de mejorar el factor de potencia, así como de reducir el nivel de inyección de corriente armónica [23].

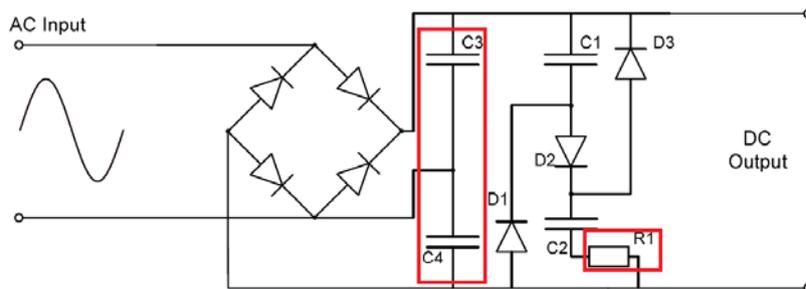


Figura 45. Control de lámparas LED pasivo con filtro valley-fill optimizado [23].

Circuitos con filtros activos

El filtrado activo es más sofisticado y costoso de obtener pero permite mejorar el factor de potencia del balasto electrónico hasta alcanzar valores próximos a la unidad. Estos filtros pueden ser de baja frecuencia ofreciendo posibilidades de control dentro de ciertos límites y donde el mayor inconveniente es la necesidad de elementos reactivos elevados y la lenta respuesta de la regulación en la salida. Otra alternativa son los filtros activos de alta frecuencia permitiendo que los componentes del circuito se reduzcan de tamaño lo que resulta muy importante en las aplicaciones de iluminación [24] [19]. Ambos sistemas tanto de baja y alta frecuencia pueden ser implementados de forma directa con los convertidores vistos en el apartado de configuraciones estándar y utilizan interruptores controlados para corregir el factor de potencia a la entrada. Así, en los sistemas sin corrección del factor de potencia el control tenía como único objetivo mantener la corriente de salida constante, ahora además mediante el modo de operación y variación de ciertos parámetros como el ciclo de trabajo (duty cycle) se busca acercar el factor de potencia a la unidad [23].

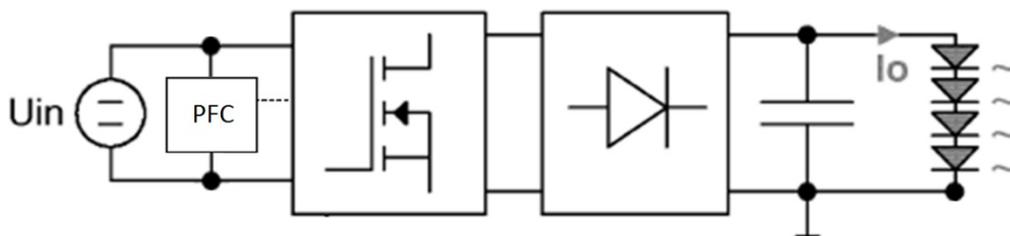


Figura 46. Esquema de control no aislado para lámparas LED con control activo.

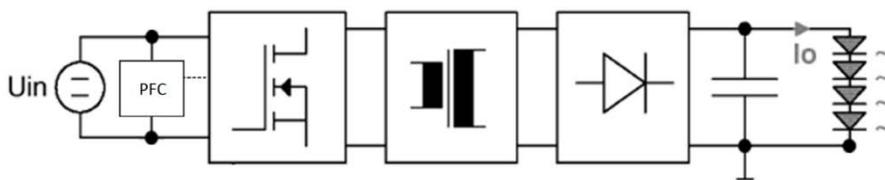


Figura 47. Esquema de control aislado para lámparas LED aislado con control activo.

Las Figura 46 y Figura 47 muestran esquemas generales de controles LED con corrección del factor de potencia para los convertidores sin aislamiento y aislados respectivamente (también estarían relacionados con el esquema de la Figura 20).

En la literatura se pueden encontrar análisis e implementación de estos sistemas. Ejemplos de ello son, convertidor doble buck-boost integrado en [26] funcionando como dos convertidores buck-boost en cascada, uno de ellos corrige el factor de potencia en la entrada y el otro de suministrar la carga con corriente constante o en [27] donde se analiza un convertidor flyback con control de tensión, en el cual la realimentación de la señal de corriente de salida funciona en paralelo con una etapa de compensación para la optimización de la entrada.

3.1.2. Circuitos electrónicos de lámparas LED con regulación-dimming

La capacidad para disminuir la intensidad de la luz se conoce como regulación o dimming. La regulación LED surge de la mano de aplicaciones específicas donde los niveles de iluminación deben adecuarse a las necesidades, prestaciones, productividad o ahorro. Ejemplo de esto es que La regulación puede representar un ahorro considerable en el consumo eléctrico, y por tanto las técnicas de control de regulación juegan un papel importante en las expectativas futuras de iluminación LED [28].

El brillo en las cadenas de LEDs es aproximadamente proporcional a la corriente media suministrada. Es importante distinguir entre el *control externo de la regulación* de los LEDs y las técnicas que se deben incorporar al circuito electrónico de las lámparas LED para trasladar la orden de *regulación del circuito* externo al valor de la corriente suministrada a los LEDs [29].

En general los *controles externos* de regulación son comunes para cualquier sistema de iluminación y la mayoría de los sistemas LED futuros que sustituyan los sistemas de iluminación actuales deben poder integrarse con los sistemas de control existentes. En función de dicho control externo existen distintas técnicas incorporadas al circuito electrónico para el control de la corriente de los LEDs. Así se puede distinguir los circuitos de regulación exterior que se verán a continuación.

3.1.2.1. Circuito externo de regulación por control de fase AC

Es el más utilizado en los sistemas de iluminación domésticos, también conocido como regulación TRIAC. Este opera cortando parte de la onda AC, con un ángulo de regulación proporcional a la fase de la onda AC donde ocurre el corte, por ello el término de regulación de *corte de fase* o *control de fase*. El tipo más común trocea la parte inicial de la onda (Figura 48 Arriba). El control mide cada paso por cero de la entrada AC, y espera el periodo de retraso fijado para activar el interruptor TRIAC y alimentar la salida. La onda entregada AC tendrá entonces un trozo menos cada medio periodo. Un segundo tipo de control de fase, incluye un circuito para garantizar el corte simétrico (para que el instante de corte $t+$ de la semionda positiva sea igual al instante de corte $t-$ de la semionda negativa). Un tercer tipo opera de forma inversa cortando la parte final de la onda también denominado como *control de fase inverso* (Figura 48 Abajo) [29].

De forma tradicional, estos sistemas se diseñaron para lámparas incandescentes, que pueden considerarse con un comportamiento de tipo lineal, en éstas el brillo depende directamente de la potencia media de la entrada AC. Troceando tanto el inicio o final de la onda se reduce la potencia y se regula el brillo de la lámpara. Este no es el caso de la iluminación LED por lo que es necesario incorporar distintas modificaciones al circuito electrónico de la lámpara para adaptar su funcionamiento a este control [29].

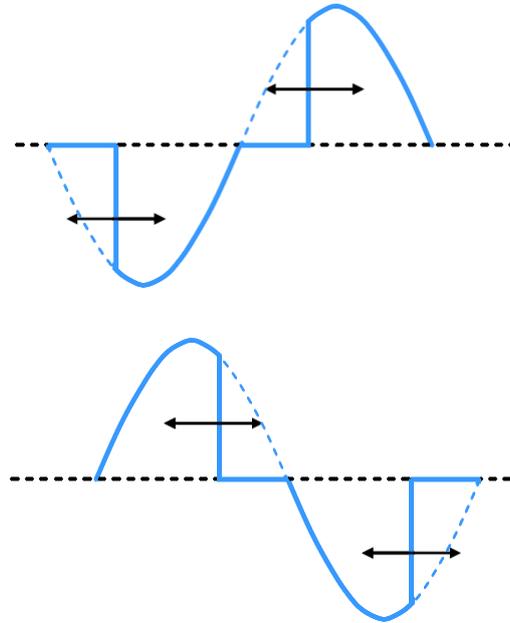


Figura 48. Forma de onda de entrada por control de fase. Arriba: Control directo. Abajo: Control inverso [29].

Existen dos posibles modificaciones del circuito electrónico, pudiéndose constituir el circuito en dos o una etapa (Figura 49). En ambos se utiliza un sensor de fase para medir la regulación solicitada por el control externo y esa información se envía a un circuito con aislamiento galvánico encargado de gestionar el control PWM de la corriente suministrada a los LEDs. Así si el regulador de corriente es externo al bloque FCC o forma parte de este se distinguirá el circuito de dos o una etapas.

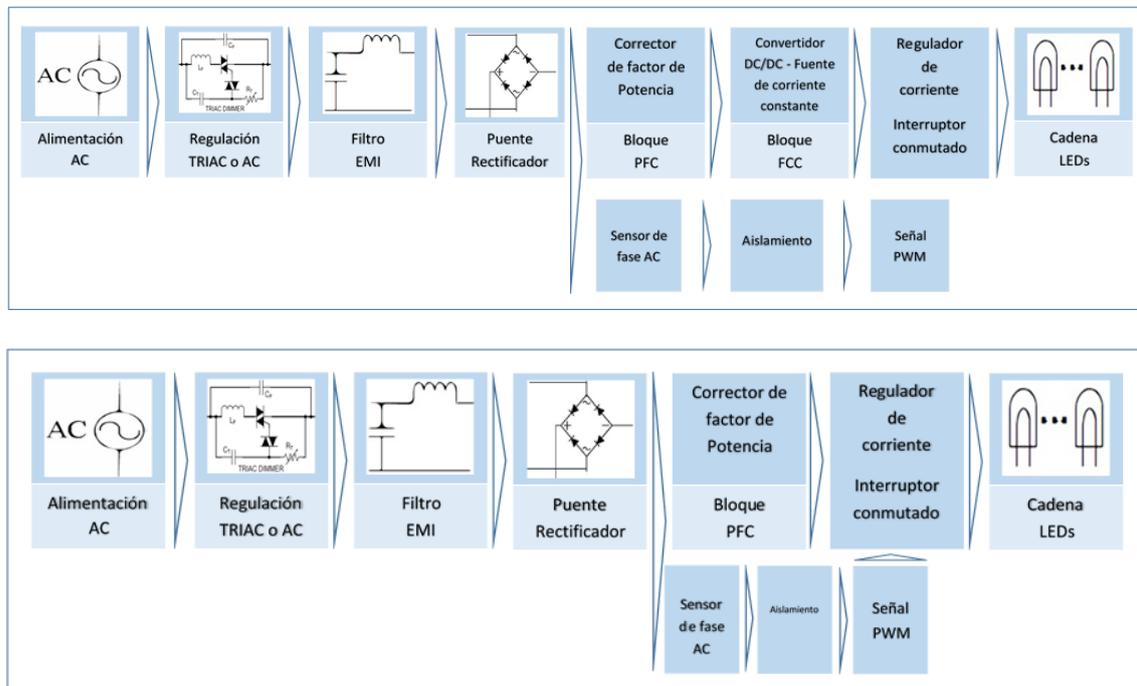


Figura 49. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con regulación externa TRIAC. Arriba: Circuito de dos etapas. Abajo: Circuito de una etapa.

En la regulación PWM (Figura 50) los LEDs son alimentados por corrientes pulsantes a altas frecuencias variando el ancho de pulso entre la corriente directa recomendada (para el máximo brillo) y cero. Los LEDs se encienden y apagan pero la frecuencia es lo suficientemente elevada para asegurar que no sea perceptible a la vista y que esté fuera del rango audible para evitar problemas de ruido (aproximadamente 200Hz [29]). La regulación se lleva a cabo ajustando el ciclo de trabajo (duty cycle) de la corriente suministrada a los LEDs [29]. Cuanto más elevado sea el ciclo de trabajo será mayor el brillo por la elevada corriente media suministrada a los LEDs. Debido a la característica pulsante de la regulación PWM para obtener el máximo brillo el ciclo de trabajo deberá ser igual a la unidad. Así la anchura de los pulsos, es decir el valor de la corriente suministrada, es función de la medida del sensor de fase, es decir función de la regulación externa solicitada.

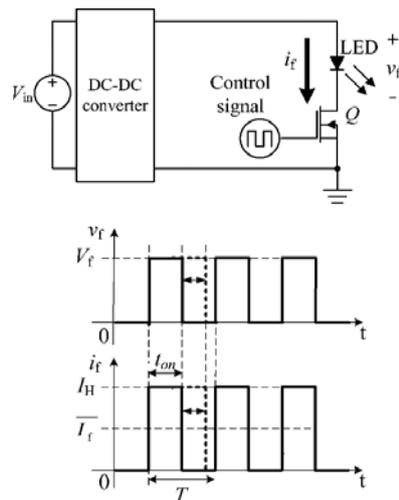


Figura 50. Diagrama técnico de regulación PWM [30].

En la Figura 51 se observa el montaje de un circuito LED con regulación TRIAC, en él se puede identificar de forma clara un esquema de una sola etapa y cada uno de los equipos que lo conforman. Alimentación (1), regulación (2), filtro EMI (2), puente rectificador (4), sensor del ángulo de fase (5), control PWM (6), convertidor (7), fuente de corriente constante (8) y carga LED (9).

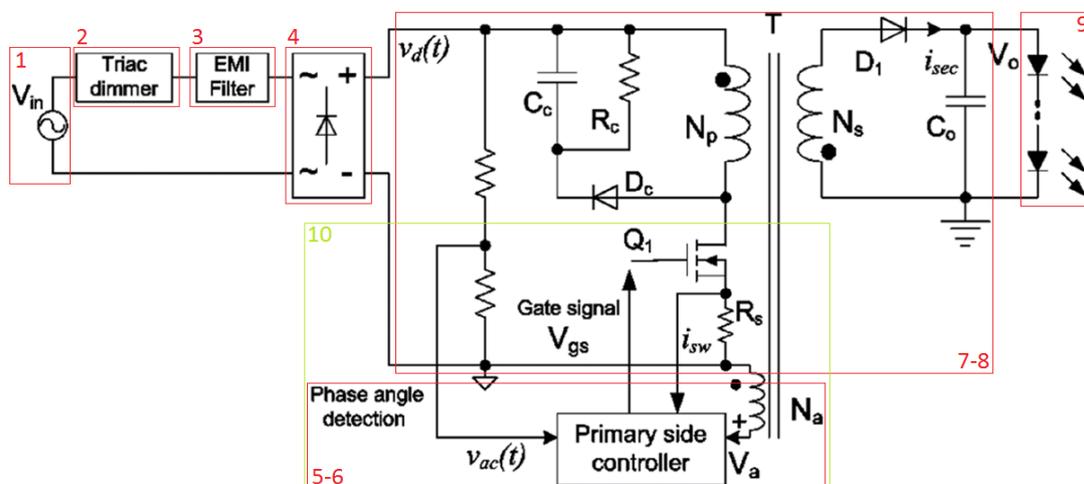


Figura 51. Control de una etapa con convertidor flyback y regulación TRIAC [31].

El circuito de control del sistema representado en la Figura 51 se encarga de controlar la corriente de salida, corrección del factor de potencia y regulación-dimming. El control de la corriente de salida calcula la corriente necesaria basándose en las medidas del primario del convertidor en función de la corriente deseada. El control del *FP* controla el conmutador del primario del convertidor basándose en el error para ajustar la entrada y el factor de potencia, en cuanto a la regulación-dimming modifica la corriente de salida en función del ángulo de regulación, se compara la tensión de salida del puente rectificador con una referencia, el resultado será un ancho de pulso (tipo PWM) proporcional al ángulo de regulación e igual a la corriente de referencia [31]. Otros ejemplos que utilizan sistemas similares con controles de una etapa y regulación TRIAC [32] [33] o [34].

3.1.2.2. Analógico (0-10V)

La regulación analógica utiliza un cable de control separado para ofrecer una señal de regulación de 0-10V (definido en el estándar IEC 60929 Anexo E). A partir de dicha señal se indicará el valor de la corriente que se debe suministrar a los LEDs. Cuando la entrada de regulación es cero, la salida es cero, cuando es 10V la salida entrega el brillo máximo. Si no se utiliza la señal de regulación simplemente se puede dejar como un circuito abierto, internamente esta se fija a 10V y entrega el máximo brillo [29].

A diferencia del control externo por fase, este tipo de circuito de regulación externo puede controlar directamente el resultado de la corriente de los LEDs. Para ello en este caso existen dos técnicas la modulación de amplitud (AM) o ancho de pulso (PWM).

En el control AM (Figura 52) la corriente DC por los LEDs es controlada para conseguir la regulación. Suministrando más corriente a los LEDs aumenta la intensidad lumínica y reduciéndola disminuye, la respuesta es de tipo lineal. La forma típica de controlar la corriente es mediante el uso de una resistencia serie con la cadena de LEDs (resistencia variable como un potenciómetro) o un circuito de regulación de corriente. Una forma de dimming es utilizar el potenciómetro para ajustar la corriente enviada a los LEDs aumentando o disminuyendo su valor [30] [29].

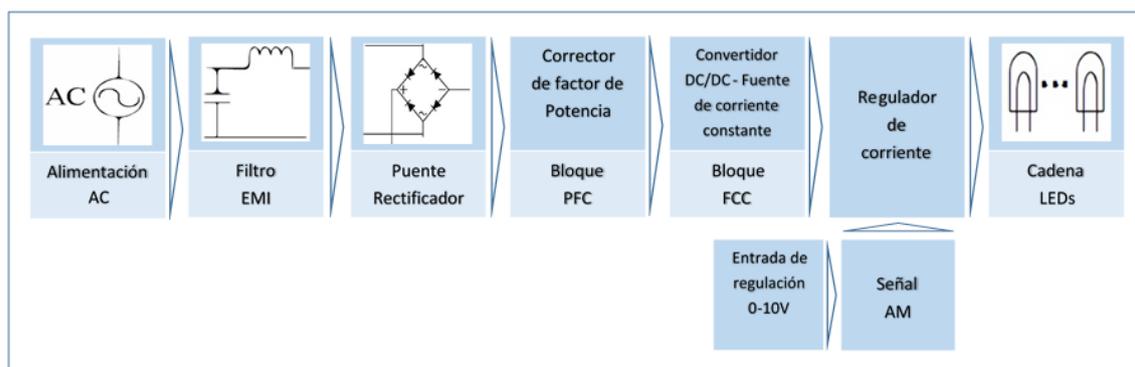


Figura 52. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con control externa analógico 0-10V y técnica de modulación AM.

El objeto de la regulación AM (Figura 53) es que a partir de un valor de tensión de referencia ajustable en función de la corriente deseada (V_{ref}) se compare con la tensión de salida del convertidor para llevar a cabo la regulación. Para su funcionamiento es necesaria una salida

de tensión del convertidor estable puesto que la aparición de rizado en la tensión de salida puede provocar grandes variaciones en la corriente LED.

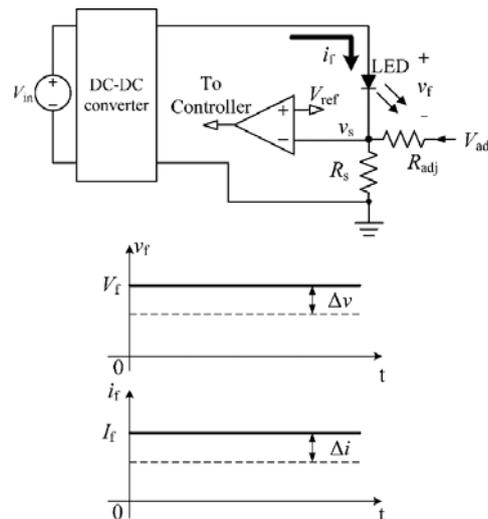


Figura 53. Diagrama técnica de regulación AM [30].

La modulación de amplitud trabaja de forma óptima en la mayoría de los casos para un solo LED, su aplicación en cadenas LED es algo más complejo y puede presentar algunas dificultades debido a la necesidad de satisfacer las características de tensión y corriente propias para cada elemento, lo cual aumenta la complejidad del sistema para lograr que no se presenten problemas de parpadeo de algunos de los LEDs o variaciones de color [30].

Si la regulación es de tipo PWM (Figura 54) será similar a la llevada a cabo en la regulación por control de fase vista con anterioridad. Para este caso la anchura de los pulsos irá asociada al valor (0-10V) de la entrada analógica. La técnica PWM permite una regulación más uniforme que la AM y evita los problemas parpadeo y variación de color.

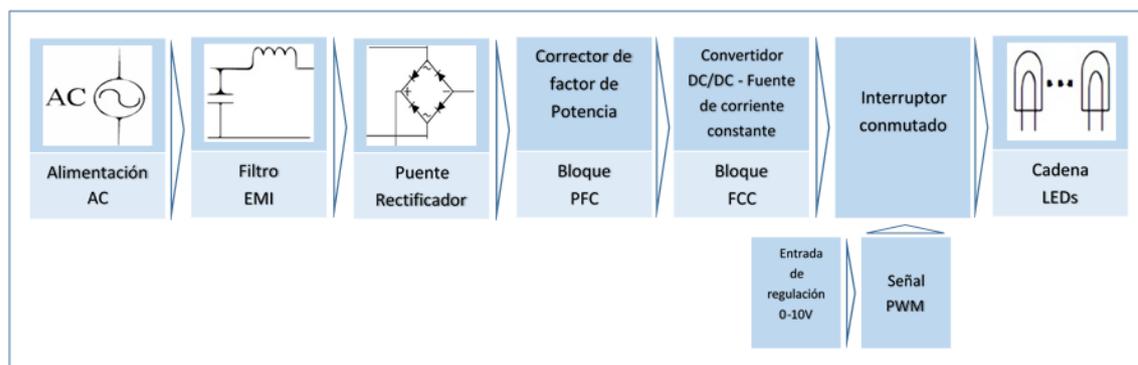


Figura 54. Diagrama de circuito electrónico de alimentación de lámparas LED con control externa analógico 0-10V y técnica de modulación PWM.

3.1.2.3. Control Lógico

Una forma simple de regulación simplificada puede implementarse con un número de niveles de brillo (dos o tres) fijado por entradas. Un ejemplo puede ser un sensor de movimiento para iluminación, que solo entrega el máximo brillo cuando es activado. La regulación propia de nuevo puede llevarse a cabo de forma analógica o con un control

PWM. Ya que interesa la simplicidad de este sistema, es usual su utilización para fijar un par (o tres) de niveles de corriente seleccionados por las entradas lógicas. Se implementa de forma similar al control analógico mediante regulador de corriente, pero su funcionamiento responde a condiciones lógicas (Figura 53) [29].

3.2. Forma de onda de la corriente consumida

En las secciones previas se han estudiados las topologías utilizadas en los circuitos electrónicos de alimentación de las lámparas LED distinguiendo para las lámparas LED no regulables dos grupos:

- Circuitos electrónicos básicos: Formados por las configuraciones estándar (mejoradas o no mejoradas) con y sin aislamiento galvánico.
- Circuitos electrónicos con factor de potencia mejorado: Formados por las configuraciones con y sin aislamiento galvánico que utilizan diversos sistemas para la mejora del factor de potencia.

Clasificar los circuitos no regulables en estas dos familias permite delimitar el análisis de la forma de onda de la corriente consumida por las lámparas LED y de su espectro armónico. En general, el primer grupo corresponderá a la mayoría de lámparas LED de potencias inferiores a 25 W ya que las normas no limitan su emisión de armónicos mientras que si lo hacen para las lámparas de potencias superiores. No obstante, la utilización de dispositivos para mejorar el factor de potencia en las primeras lámparas queda a potestad de los fabricantes, y existen en el mercado algunas que incorporan mejoras simples que permiten reducir la distorsión armónica de la corriente consumida mejorando sus prestaciones desde el punto de vista de la red eléctrica.

Así, en las Figura 55 y Figura 57 se presentan estudios llevados a cabo en la literatura para diferentes tipos de lámparas existentes en el mercado con el fin de representar el comportamiento de los balastos LED con distintos tipos de filtrado [13] [36].

La Figura 55 muestra los resultados del estudio de lámparas de distinta potencia y fabricante cuyo balasto electrónico está incluido en la lámpara, estas emplean rosca estándar tipo E-27, E-14 o GU-10 y todas las lámparas fueron diseñadas para operar 240V y una potencia de 3 a 10W (los datos técnicos de las lámparas del ensayo se muestran en Tabla 6). La Figura 56 a modo de detalle muestra una comparativa entre dos lámparas de las mostradas en la Tabla 6 y que corresponden a distintos fabricantes.

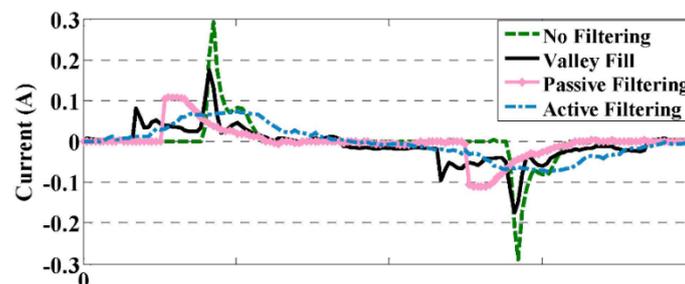


Figura 55. Formas de onda de corriente obtenida para lámparas LED con distintos tipos de filtrado [13].

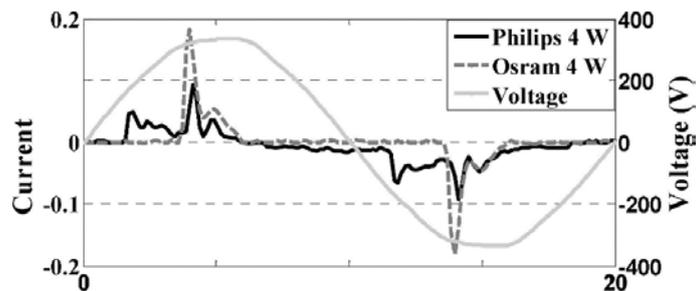


Figura 56. Comparación de forma de onda de corriente entre lámparas de distintos fabricantes [13].

Datos técnicos de lámparas simuladas				
Fabricante	Potencia nominal (W)	Corriente (mA)	Luminosidad (lm)	Vida esperada (Años)
Phillips Cool Daylight	4	27	250	25
Phillips Cool Daylight	5	32	350	25
Phillips Warm Daylight	7	39	350	25
Osram Daylight	4	40	250	25
Osram Daylight	6	53	365	25
Osram Cool White	8	47	450	25
Osram Warm White	3	26	250	25
Osram Warm White	10	48	950	25
Toshiba Cool White	5,5	44	290	40
Viri-bright Cool White	5	55	230	6
Cash Warm White	7	67	580	20
Evenzo Cool White	3	33	150	18

Tabla 6. Características de lámparas ensayadas en [13].

Se observa que la mayoría de las lámparas Phillips emplean circuitos valley fill, las lámparas Toshiba sistemas pasivos, las lámparas Osram filtros activos y algunas otras simplemente no utilizan ningún tipo de filtro. Por tanto en función del tipo de filtrado y pico de corriente dibujado podrían calificarse como lámparas de mejor o peor calidad en términos de inyección armónica a la red [13]. Los detalles de los análisis del espectro armónico de corriente de las lámparas analizadas en la Figura 55 se muestran a continuación en la Tabla 7.

Lámpara ensayada	Armónico (%)					
	Fundamental	3º	5º	7º	9º	THDi
Phillips 4W	100	34,61	6,28	22,27	18,94	63,05
Phillips 5W	100	36,92	7,16	19,81	19,339	63,83
Phillips 7W	100	32,34	11,6	23,4	19,03	64,23
Osram 4W	100	89,24	70,65	51,16	38,57	173,9
Osram 6W	100	91,96	77,05	58,51	41,01	174,3
Osram 8W	100	22,25	15,04	2,34	9,73	30,94
Osram 10W	100	32,12	4,68	2,67	6,45	34,78
Evenzo 3W	100	90,7	77,34	58,59	45,32	164,35
Bright 5W	100	86,65	75,92	61,75	48,87	167,2
Cash 7W	100	91,23	74,81	56,41	41,06	168,2
Toshiba 5.5W	100	73,4	45,4	35,62	31,38	106,3

Tabla 7. Resultados del análisis espectral de lámparas LED [13].

De igual forma que en el estudio de la Figura 55 en la Figura 57 y Figura 58 también se estudia la corriente de entrada en distintos tipos de lámparas LED y se analiza su espectro armónico. Las características técnicas de las lámparas LED ensayadas se especifican en Tabla 8.

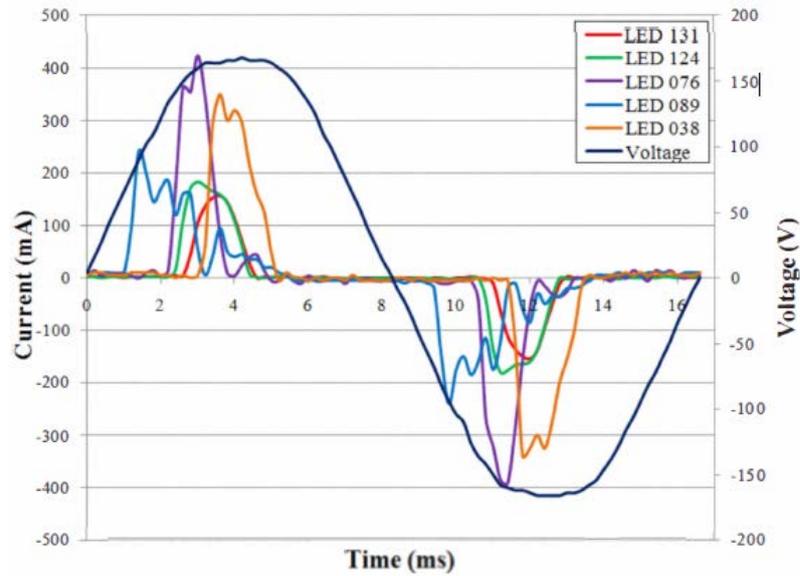


Figura 57. Forma de onda de tensión y corriente para distintas lámparas LED [8LS].

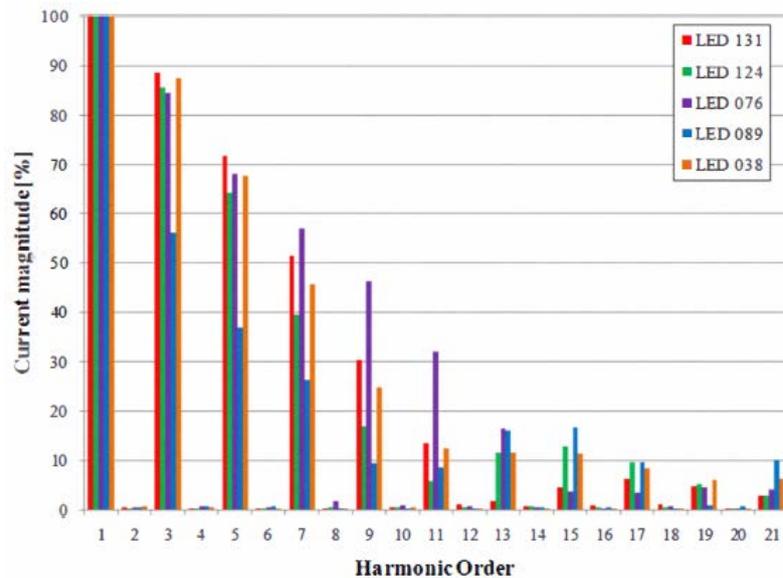


Figura 58. Distribución armónica de corriente para distintas lámparas LED [8LS].

Lámpara ensayada	Valores medidos				
	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)	PF	THDi (%)
LED-131	3,5	120,1	3,75	0,59	129,82
LED-124	5,5	120	4,9	0,6	117,49
LED-076	7	120,1	7,47	0,51	136,36
LED-089	7	120	5,71	0,57	79,89
LED-038	7,5	119,8	8,54	0,6	125,07

Tabla 8. Características técnicas LED ensayados [8LS].

De nuevo se puede observar la influencia de la electrónica de los balastos en la distorsión de la corriente consumida por las distintas lámparas LED.

En las siguientes subsecciones se presentan diferentes circuitos programados en Matlab/Simulink a partir del análisis de las topologías de drivers realizadas en la Sección 3.1 y que permiten simular su comportamiento y obtener sus corrientes consumidas. Con ello se podrá analizar el efecto de las posibles mejoras del factor de potencia que se realizan sobre las lámparas LED.

3.2.1. Circuito electrónico básico con configuración estándar y sin aislamiento galvánico

Según la Figura 25, se analiza el circuito de alimentación con convertidor buck (convertidor buck en Figura 60). El modelo de la Figura 59 sigue la estructura descrita en el esquema de la Figura 19 para los circuitos de alimentación LED estándar (suprimiendo el filtro EMI de la entrada y que no se ha introducido en el modelo de simulación). Los parámetros del circuito estudiado se presentan en la Tabla 9.

El circuito modelado cuenta con una fuente de alimentación 230VAC, puente rectificador (de color verde en el modelo), condensador de suavizado (de color magenta) convertidor buck DC/DC (de color amarillo) y cadena de LEDs (de color cian). Las características de la carga son similares a las que se podrían encontrar en lámparas LED comerciales. Otros aspectos a considerar para la implementación del modelo son la resistencia ($89,79\Omega$ de color naranja) y la tensión (31VDC) que modelan la cadena completa de LEDs y cuyos parámetros atienden a la simulación de la potencia y corriente consumida por la propia carga. También hay que añadir que la utilización de la resistencia en serie con la carga permite llevar al lazo de control (PWM) del convertidor el valor de corriente para el control de la corriente de salida.

Convertidor buck						
	Fuente de alimentación AC	Resistencia de entrada AC	Puente rectificador	Condensador de filtrado lado DC	Convertidor buck	Cadena LEDs
Tensión (V)	230 (AC)	-	-	-	-	31 (DC)
Fase (°)	0	-	-	-	-	-
Resistencia (lado AC) (Ω)	-	40	-	-	-	-
Puente rectificador	R snubber (Ω)	-	1,00E+06	-	-	-
	C snubber (F)	-	1,00E-15	-	-	-
Condensador (lado DC) (F)	-	-	-	1,00E-05	-	-
Dispositivo electrónico	-	-	-	-	Mosfet	-
Rama serie convertidor	Resistencia (Ω)	-	-	-	12,9013	-
	Inductancia (H)	-	-	-	6,61E-04	-
Rama paralelo convertidor	Resistencia (Ω)	-	-	-	0,8065	-
	Condensador (F)	-	-	-	2,33E-06	-
Potencia (W)	-	-	-	-	-	11
Corriente (mA)	-	-	-	-	-	0,35
Resistencia serie (LEDs) (Ω)	-	-	-	-	-	89,79

Tabla 9. Características modelo Simulink convertidor buck.

El modelo permitirá ver la forma de la corriente consumida por la lámpara así como la corriente y tensión suministradas a la cadena de LEDs.

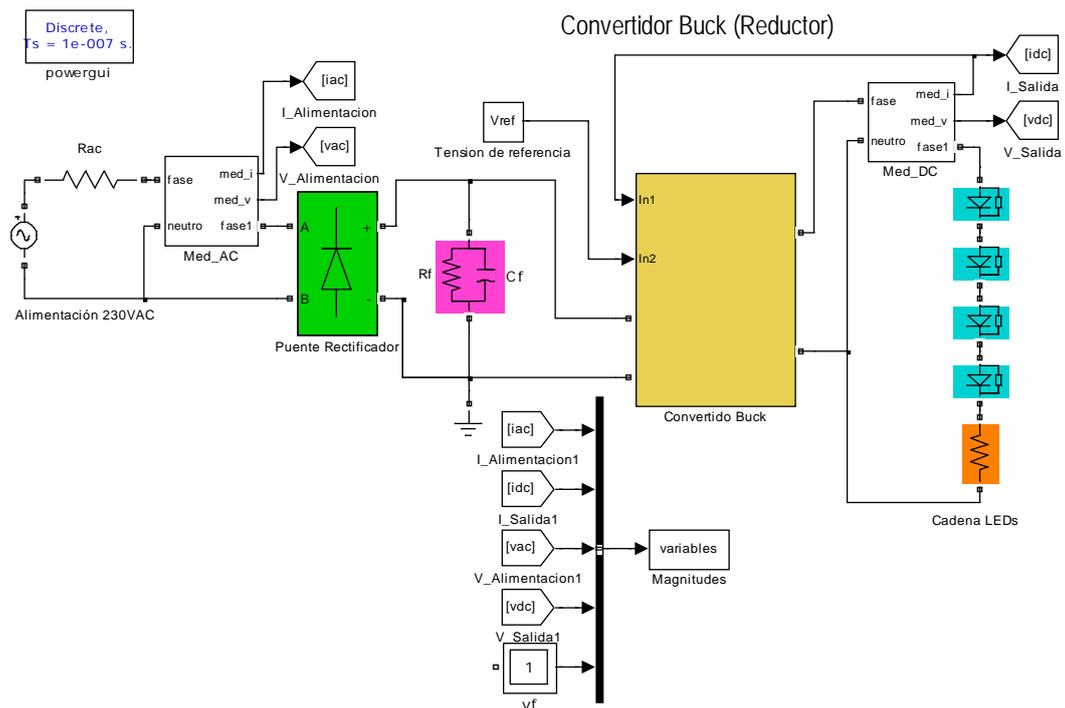


Figura 59 .Modelo Simulink de circuito alimentación LED mediante convertidor buck.

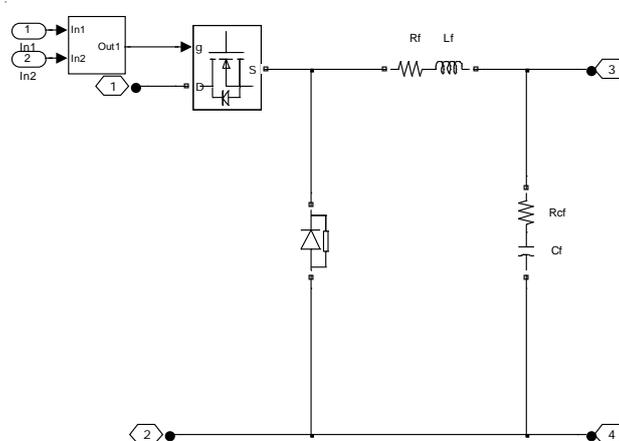


Figura 60. Modelo Simulink convertidor buck.

Las ondas de tensión y corriente a la entrada de la lámpara LED se presentan en la Figura 61. También se presentan las gráficas de la tensión y corriente de salida del convertidor buck, es decir sobre la cadena de LEDs (Figura 62).

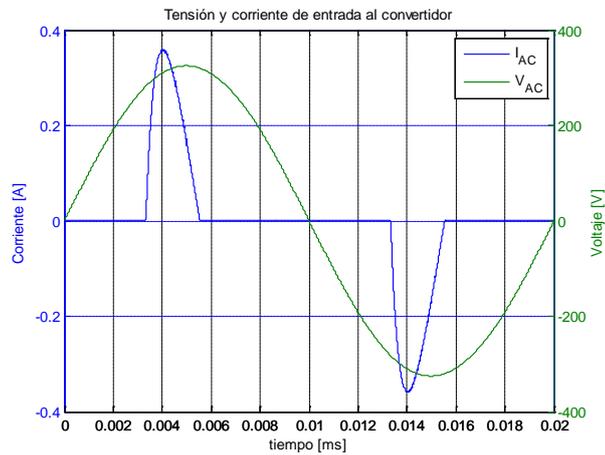


Figura 61. Tensión y corriente de entrada del convertidor.

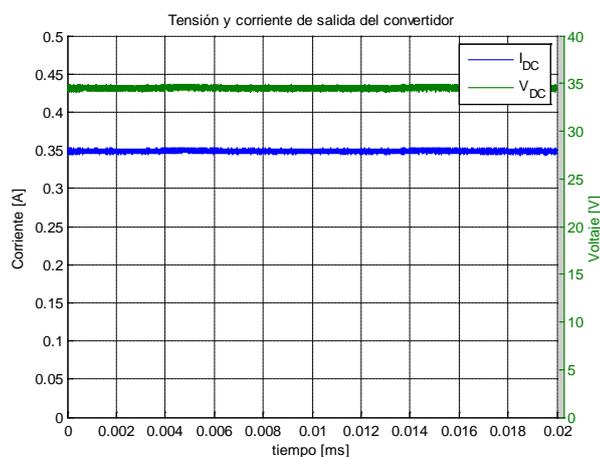


Figura 62. Tensión y corriente de salida convertidor.

Para caracterizar el contenido armónico de la corriente consumida por la lámpara se analizan las siguientes variables:

- Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion, THD): Es la relación entre el contenido armónico de la señal y su componente fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \times 100\%$$

- Distorsión armónica individual (Harmonic Distortion, HD): Es la relación entre cada componente armónico y la componente fundamental.

$$HD_k = \frac{I_k}{I_1} \times 100\%$$

- Factor de distorsión (Distortion Factor, DF): Relación que describe como la distorsión armónica de la corriente de una carga reduce la potencia media transferida a la carga.

$$DF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}}$$

- Factor de desplazamiento (Displacement Power Factor, DPF): Relación entre la potencia fundamental y el producto de los valores eficaces de la tensión y corriente a la frecuencia fundamental.

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{V_1 \times I_1}$$

En la Figura 63 se presenta el estudio armónico de la corriente consumida por la lámpara LED. En concreto se puede observar la distorsión armónica individual HD_{ik} de dicha corriente, su distorsión armónica total THD_i y se presenta su factor de distorsión DF_i .

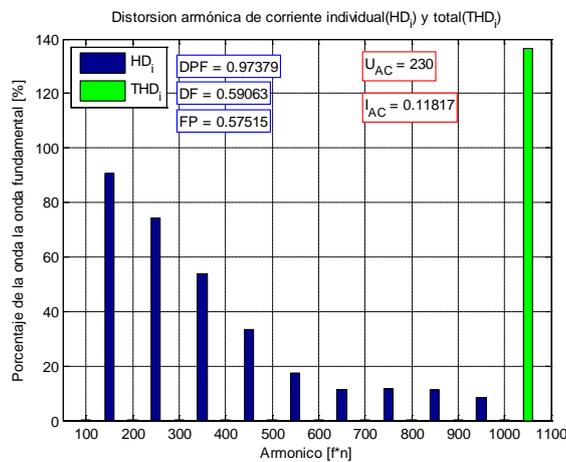


Figura 63. Espectro armónico de corriente de entrada.

También se presenta el valor eficaz de la tensión y la corriente de entrada, U_{AC} e I_{AC} , el factor de desplazamiento DPF , y el factor de potencia de la carga FP .

3.2.2. Circuito electrónico con mejora del factor de potencia y sin aislamiento galvánico

Tomando como base el convertidor buck de la subsección anterior se implementan distintos tipos de mejoras del factor de potencia mediante la integración de circuitos de filtrado de tipo pasivo y valley fill. Las características técnicas del modelo son iguales a los presentados para el convertidor buck (Tabla 9) menos para los parámetros de los distintos filtros de los cuales se presentaran sus características por separado.

3.2.2.1. Convertidor buck con filtro inductivo en el lado AC

El modelo del convertidor buck con filtro pasivo de tipo inductivo en el lado de corriente alterna, introduce en la entrada al puente rectificador y después de la fuente de tensión una inductancia (en rojo) L de 0,29H. En el dimensionado de la inductancia se ha considerado que la caída de tensión producida por esta no sea mayor al 5-10%, en este

caso es de 4,35%. El modelo de la Figura 64 sigue la estructura descrita en el esquema de la Figura 37.

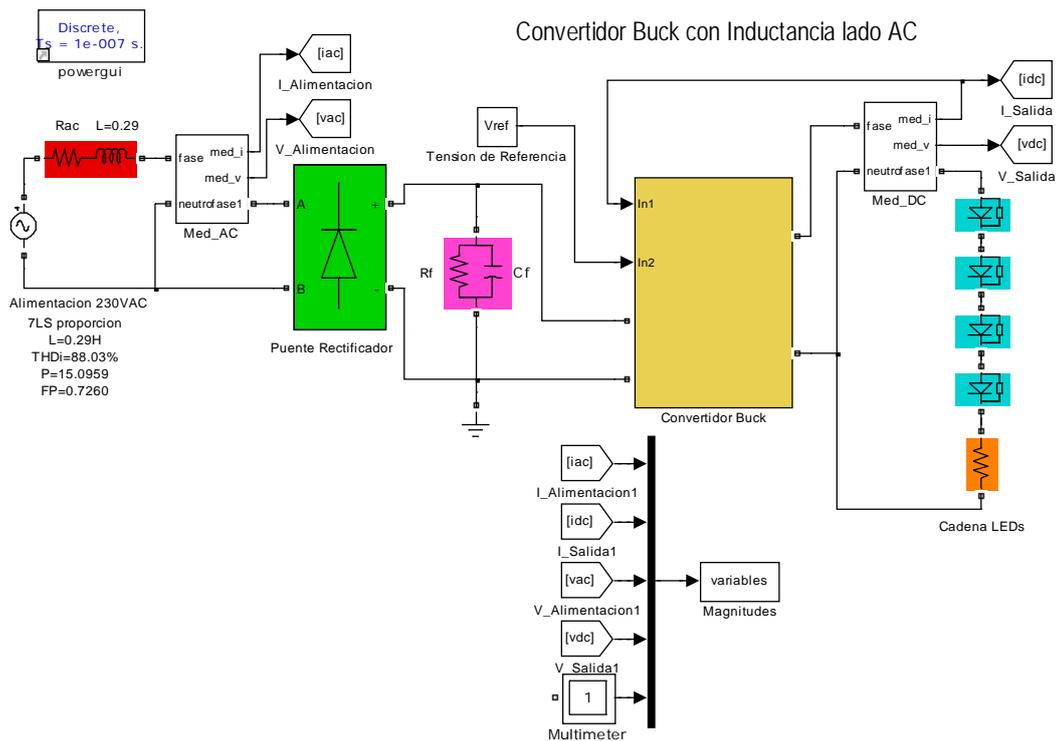


Figura 64. Modelo Simulink de circuito alimentación LED mediante convertidor buck con filtro inductivo en lado AC.

Las ondas de tensión y corriente a la entrada de la lámpara LED se presentan a continuación en la Figura 65. También se presentan las gráficas de la tensión y corriente de salida del convertidor buck, es decir sobre la cadena de LEDs (Figura 66).

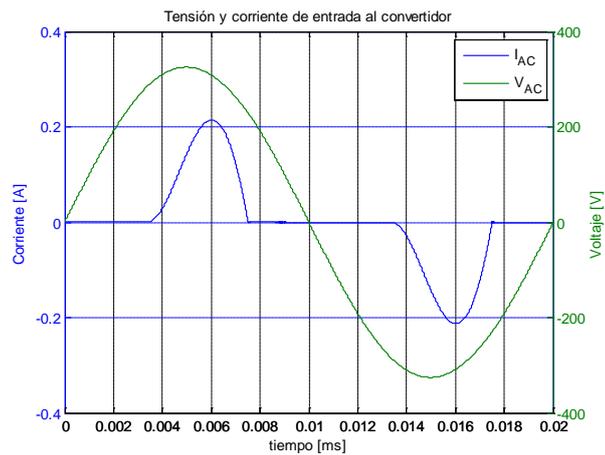


Figura 65. Tensión y corriente de entrada del convertidor.

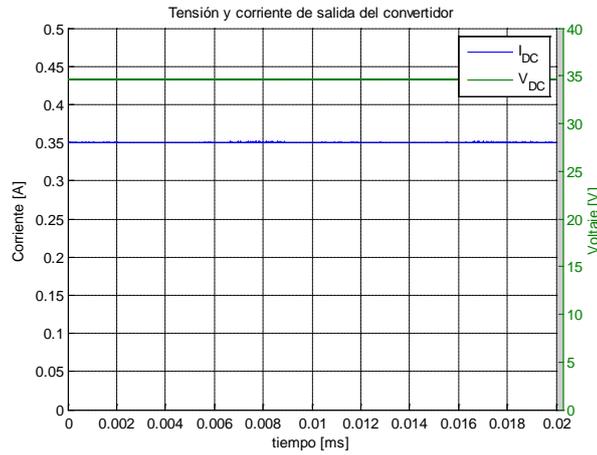


Figura 66. Tensión y corriente de salida del convertidor.

En la Figura 67 se presenta el estudio armónico de la corriente consumida por la lámpara LED. Se presentan los valores de distorsión armónica individual HDi_k de corriente, su distorsión armónica total $THDi$ y su factor de distorsión DFi . Además también se muestra el valor eficaz de la tensión y la corriente de entrada, U_{AC} e I_{AC} , el factor de desplazamiento DPF y el factor de potencia de la carga FP .

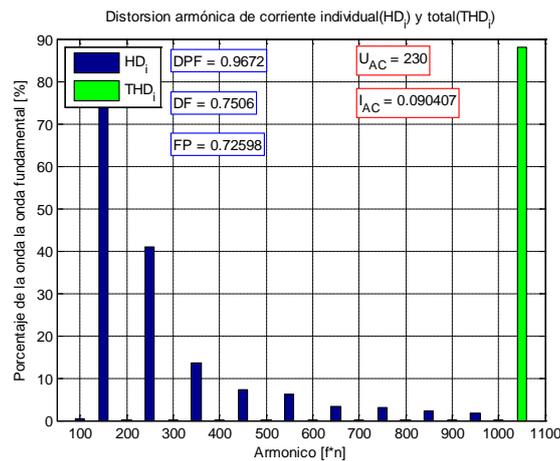


Figura 67. Espectro armónico de corriente de entrada.

3.2.2.2. Convertidor buck con filtro inductivo en el lado DC

El modelo del convertidor buck con filtro pasivo de tipo inductivo en el lado de corriente continua, introduce después del condensador de suavizado y el convertidor una inductancia (en rojo) L de $2,5e-4H$ El modelo de la Figura 68 sigue la estructura descrita en el esquema de la Figura 38.

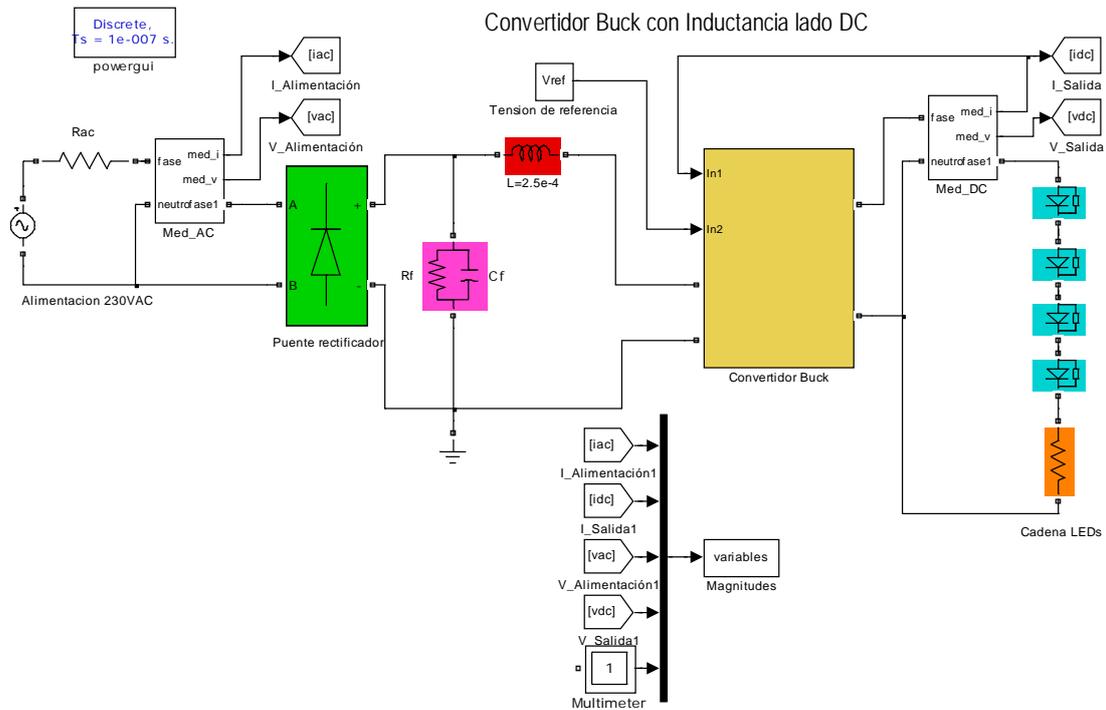


Figura 68. Modelo Simulink de circuito alimentación LED mediante convertidor buck con filtro inductivo en lado DC.

Los resultados de tensión y corriente de entrada se encuentran en la Figura 69 y la tensión y corriente de salida se encuentran en la Figura 70.

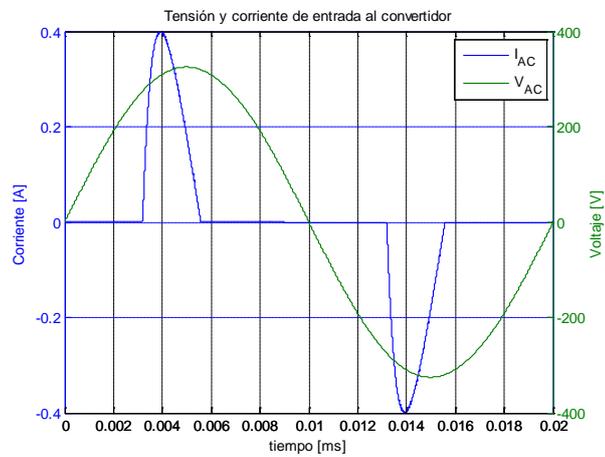


Figura 69. Tensión y corriente de entrada convertidor con filtro inductivo lado DC.

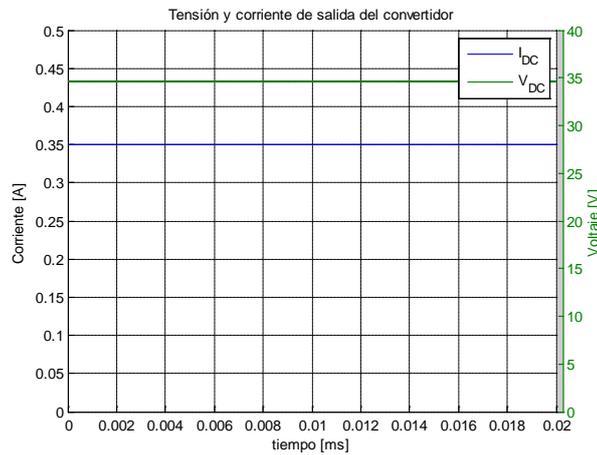


Figura 70. Tensión y corriente de salida convertidor con filtro inductivo lado DC

En la Figura 71 se presenta el estudio armónico de la corriente consumida por la lámpara LED. Se presentan los valores de distorsión armónica individual HDi_k de corriente, su distorsión armónica total $THDi$ y su factor de distorsión DFi . Además también se muestra el valor eficaz de la tensión y la corriente de entrada, U_{AC} e I_{AC} , el factor de desplazamiento DPF y el factor de potencia de la carga FP .

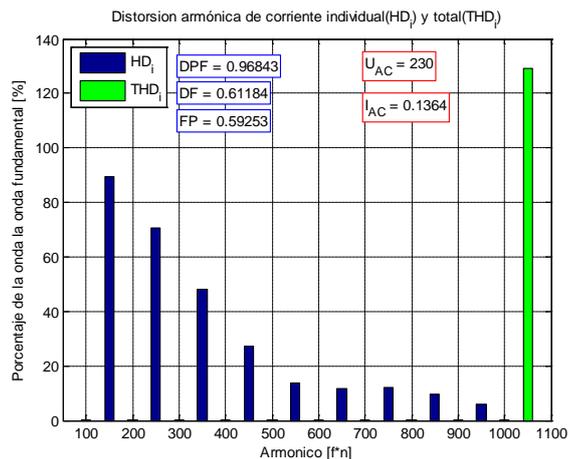


Figura 71. Espectro armónico de corriente de entrada.

3.2.2.3. Convertidor buck con filtro LCD en el lado DC

El convertidor buck con filtro LCD en el lado corriente continua añade al circuito convencional del convertidor buck entre el condensador de suavizado y el convertidor un filtro serie conformado por inductancia, condensador y diodos (ver Tabla 10).

El modelo de la Figura 72 sigue la estructura descrita en el esquema de la Figura 42. Los resultados de tensión y corriente de entrada se encuentran en la Figura 73 y la tensión y corriente de salida se encuentran en la Figura 74. En la Figura 75 se presenta el estudio armónico de la corriente consumida por la lámpara LED junto con los valores de distorsión armónica individual HDi_k de corriente, distorsión armónica total $THDi$ y factor de distorsión DFi . Además también del valor eficaz de la tensión y la corriente de entrada, U_{AC} e I_{AC} , el factor de desplazamiento DPF y el factor de potencia de la carga FP .

Filtro LCD		Magnitud
Inductancia (H)		1,08E-01
Condensador (F)		3,88E-05
Diodos	R snubber (Ω)	1,00E+06
	C snubber (F)	-

Tabla 10. Características filtro LCD.

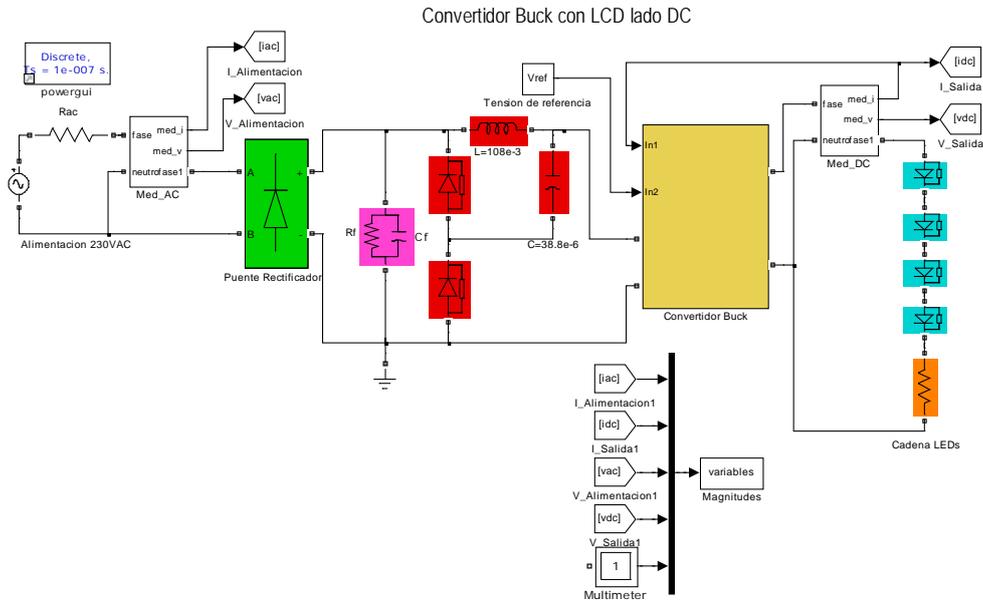


Figura 72. Modelo Simulink de circuito alimentación LED mediante convertidor buck con filtro LCD.

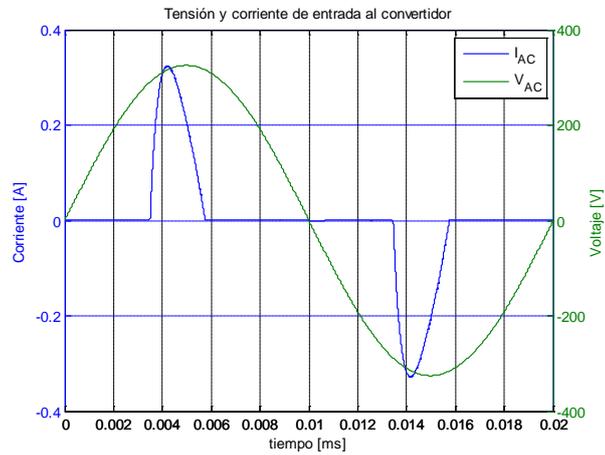


Figura 73. Tensión y corriente de entrada convertidor con filtro LCD.

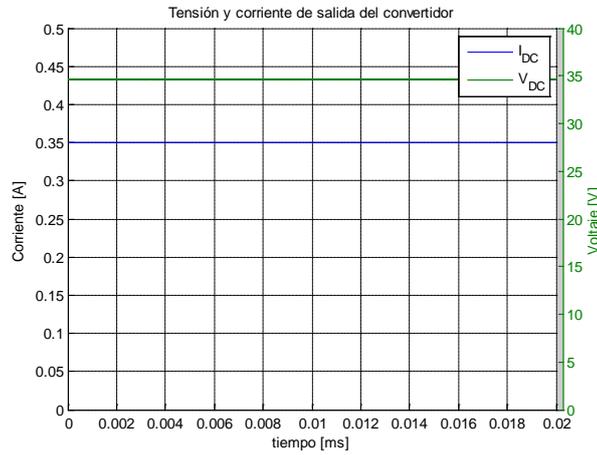


Figura 74. Tensión y corriente de salida convertidor con filtro LCD

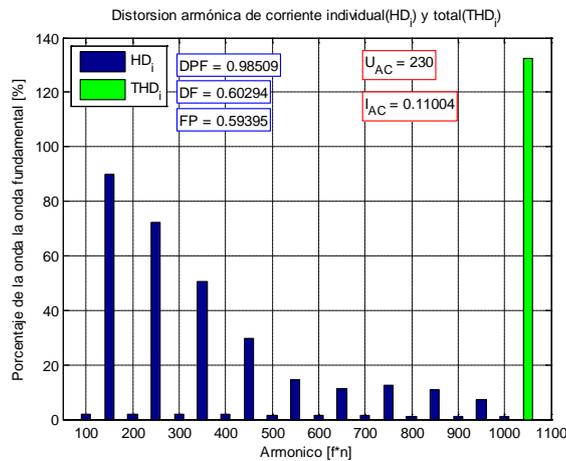


Figura 75. Espectro armónico de corriente de entrada.

3.2.2.4. Convertidor buck con filtro valley fill

En la Figura 59 se presenta el circuito de alimentación LED mediante convertidor buck con filtro valley fill (Figura 60), este circuito sigue el esquema de la Figura 44, donde después del puente rectificador se introduce el filtro. Los parámetros del circuito valley fill se muestran en la Tabla 7.

Circuito valley fill		Magnitud
Condensador (F)		2,20E-05
Diodos	R snubber (Ω)	500
	C snubber (F)	2,50E-07

Tabla 11. Características filtro valley fill.

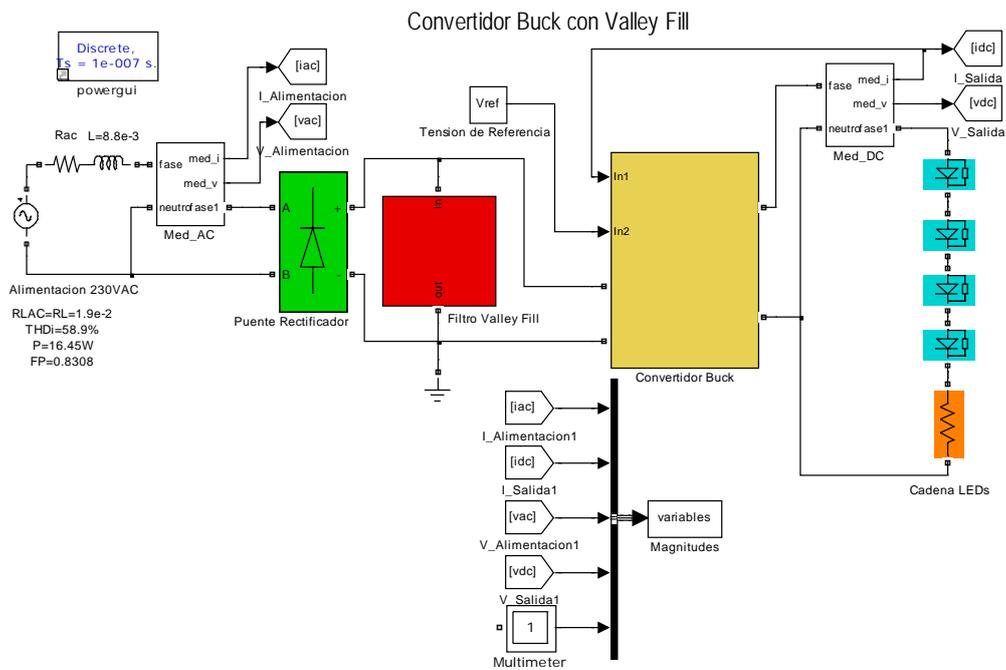


Figura 76. Modelo Simulink de circuito alimentación LED mediante convertidor buck con filtro valley fill.

Para conocer las formas de onda características se presentan graficas de tensión y corriente de entrada (Figura 78), tensión y corriente de salida (Figura 79) y análisis espectral de corriente (Figura 80) donde se muestran los valores de distorsión armónica individual HDi_k de corriente, distorsión armónica total $THDi$ y factor de distorsión DFi . Además también de su valor eficaz de tensión y corriente de entrada, U_{AC} e I_{AC} , el factor de desplazamiento DPF y el factor de potencia de la carga FP .

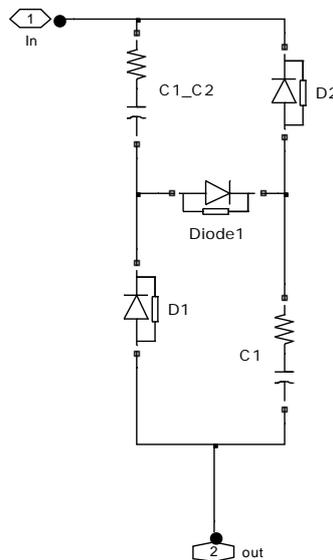


Figura 77. Modelo Simulink circuito Valley Fill.

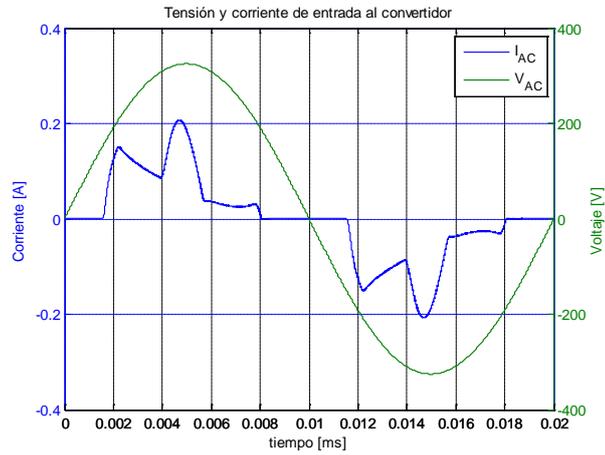


Figura 78. Tensión y corriente entrada convertidor con filtro valley fill.

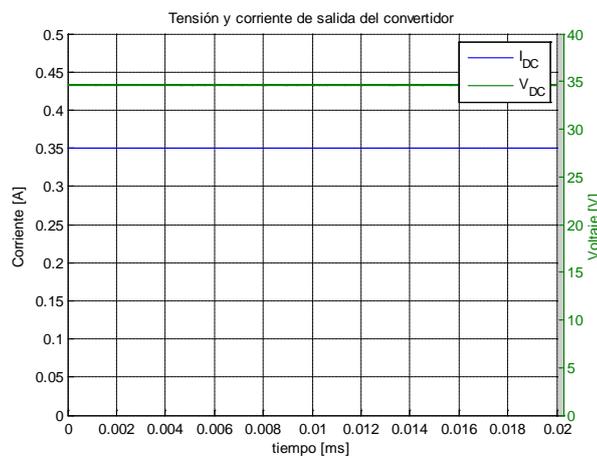


Figura 79. Tensión y corriente salida convertidor con filtro valley fill

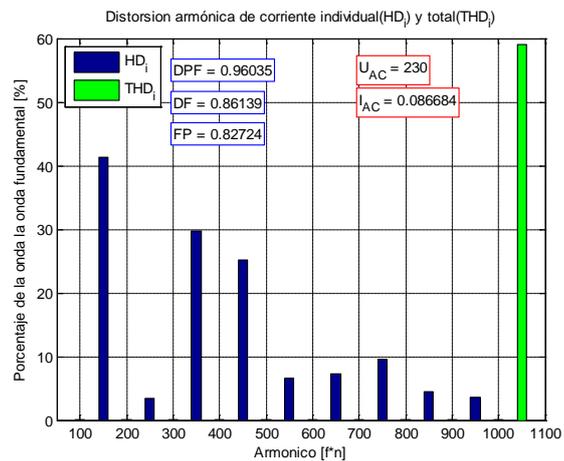


Figura 80. Espectro armónico de corriente de entrada.

3.2.2.5. Convertidor buck con filtro valley fill mejorado

El convertidor buck con filtro valley fill mejorado es el mismo circuito con filtro valley fill añadiendo un divisor de tensión capacitivo (Figura 81), (ver también Figura 45). Los parámetros del circuito valley fill mejorado se presentan en la Tabla 12.

Las formas de onda características se presentan en graficas de tensión y corriente de entrada (Figura 82), tensión y corriente de salida (Figura 83) y análisis espectral de corriente (Figura 84) donde se muestran los valores de distorsión armónica individual HDI_k de corriente, su distorsión armónica total $THDi$ y su factor de distorsión DFi . Además también de su valor eficaz de tensión y corriente de entrada, U_{AC} e I_{AC} , el factor de desplazamiento DPF y el factor de potencia de la carga FP .

Circuito valley fill mejorado		
		Magnitud
Condensador (F)		2,20E-05
Condensador del divisor (F)		6,60E-08
Diodos	R snubber (Ω)	500
	C snubber (F)	2,50E-07

Tabla 12. Características filtro valley fill mejorado.

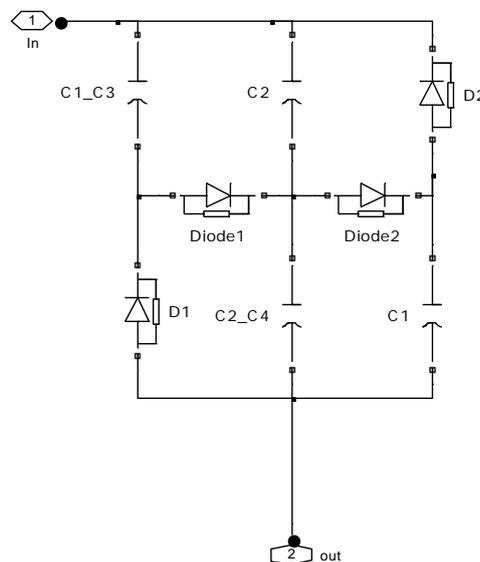


Figura 81. Modelo Simulink circuito Valley Fill mejorado (Inserción de condensadores divisores de tensión (Ver también Figura 45)).

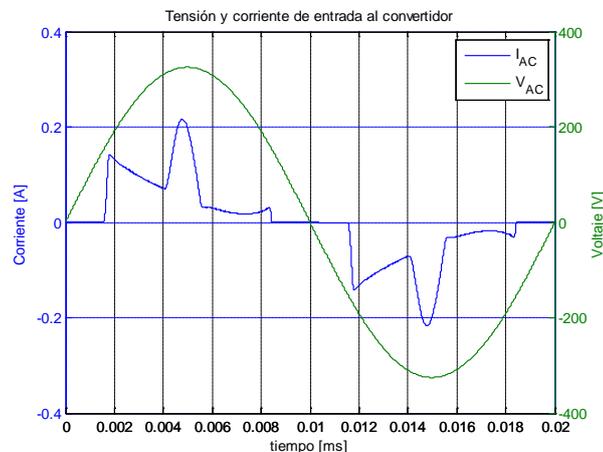


Figura 82. Tensión y corriente de entrada convertidor con filtro valley fill mejorado.

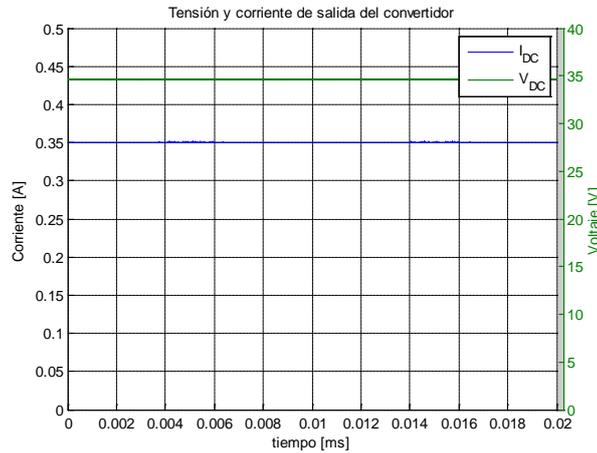


Figura 83. Tensión y corriente de salida convertidor con filtro valley fill mejorado.

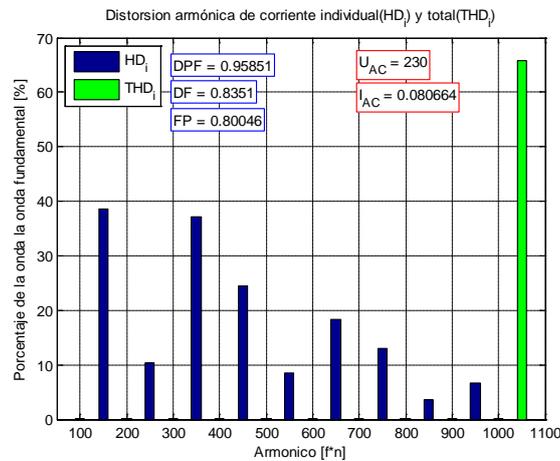


Figura 84. Espectro armónico de corriente de entrada.

3.2.3. Resumen de los resultados obtenidos en las simulaciones

A forma de detalle se presentan graficas donde se comparan las corrientes y análisis espectrales de los distintos circuitos para los primeros veinte armónicos (Figura 85 y Figura 86). En la Tabla 13 se presenta un resumen de los distintas variables características de la corriente para cada uno de los circuitos que se han simulado.

Resultados						
Circuito	Buck	Buck con inductancia lado AC	Buck inductancia lado DC	Buck filtro LCD	Buck valley fill	Buck valley fill mejorado
THDi (%)	137	88	129	132	59	66
DF (%)	59,06	75,06	61,18	60,29	86,13	83,51
FP	0,575	0,726	0,592	0,594	0,827	0,800

Tabla 13. Resumen de las características de los distintos circuito simulados.

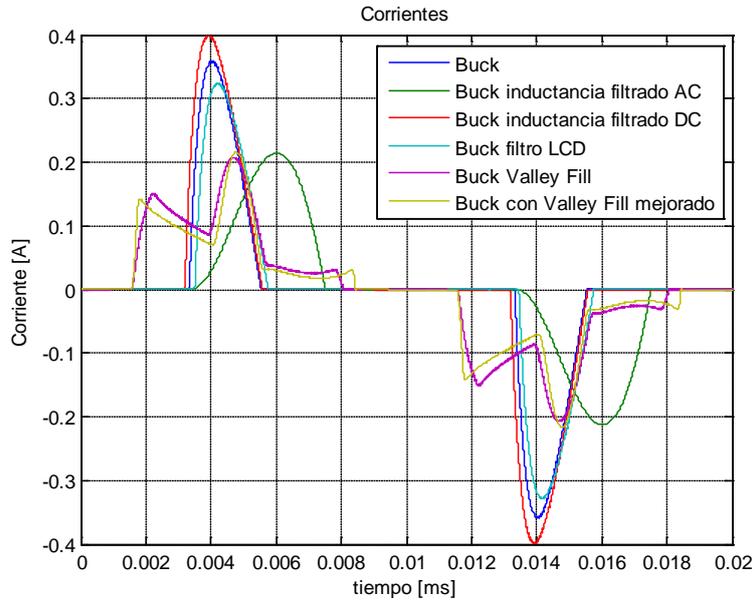


Figura 85. Comparación forma de onda de corriente de entrada de los distintos circuitos simulados.

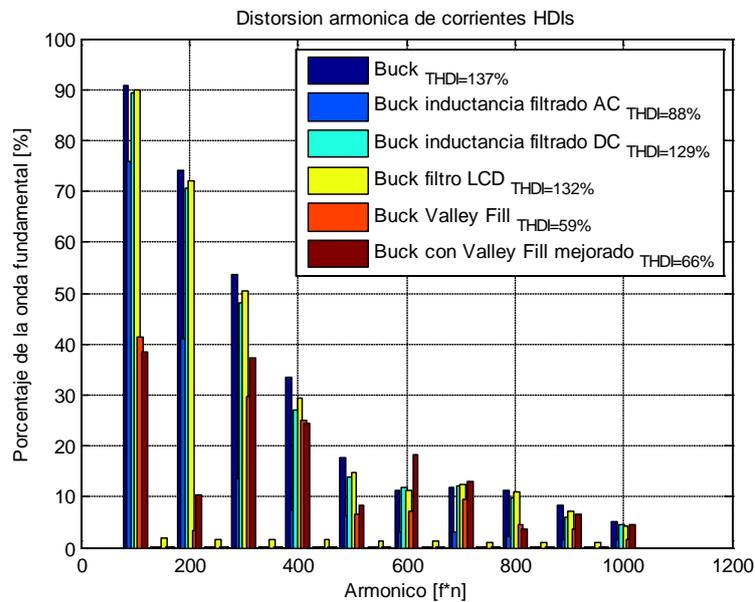


Figura 86. Comparación del espectro armónico en tanto % para los distintos circuitos simulados.

Se observa que los métodos de filtrado consiguen reducir el contenido armónico de la corriente consumida por las lámparas y, por tanto, mejorar su factor de potencia [10], [19], [23], [25]. Entre los métodos de filtrado pasivo, la configuración valley-fill es la que ofrece mejores prestaciones sin complicar excesivamente el circuito electrónico de la lámpara. Por este motivo, es uno de los métodos de filtrado más extendidos. Entre los otros métodos de filtrado, la inductancia del lado de alterna también reduce aceptablemente el contenido armónico de la corriente. Este último método ofrece una mejora inferior al circuito valley-fill pero es mucho más simple de realizar por eso también es un método bastante extendido.

4.1. Resultados y conclusiones

Durante el capítulo II se ha abordado el estado del arte de los sistemas de iluminación LED en comparación con el resto de tecnologías de iluminación existentes en la actualidad, una vez recopilado información técnica descriptiva de los distintos tipos lámparas se han clasificado en función del tipo de fenómeno que da lugar a la emisión de luz en las mismas.

- Lámparas de incandescencia:
 - Lámparas incandescentes estándar.
 - Lámparas incandescentes con halógenos.
- Lámparas de luminiscencia:
 - Fotoluminiscencia
 - Electroluminiscencia.

Cada una de estas categorías engloba las distintas tecnologías de lámparas del mercado. Además de poder plantear una clasificación para las distintas lámparas, también se ha analizado y estudiado el funcionamiento de las mismas y mencionado a forma de introducción los equipos que son necesarios para el funcionamiento de las lámparas.

En el capítulo III después de conocer la situación de las lámparas LED se da un paso más en su caracterización analizando la conformación de los distintos circuitos que alimentan las lámparas LED y clasificándolos.

- Circuitos electrónicos de lámparas LED no regulables:
 - Circuitos electrónicos básicos.
 - Configuraciones estándar con y sin aislamiento galvánico.
 - Configuraciones mejoradas con y sin aislamiento galvánico.
 - Circuitos electrónicos con factor de potencia mejorado.
 - Circuitos con filtros pasivos.
 - Circuitos con filtros activos.
- Circuitos electrónicos de lámparas LED regulables.

Se observa que de forma general los circuitos de alimentación LED se pueden clasificar en función de la posible regulación de la intensidad de luz (dimming) o no, de la utilización o no de mejoras del factor de potencia y finalmente dependiendo del tipo de convertidor o método empleado para la de mejora del factor de potencia.

Una vez estudiado los distintos tipos de configuraciones de los drivers de las lámparas, se realizan modelos en Matlab/Simulink que permitan simular el funcionamiento de la lámpara LED y poder analizar las variables eléctricas (corrientes, tensiones y potencias) en todos los puntos del dispositivo. Los resultados muestran un comportamiento no lineal con una alta emisión de armónicos (en las lámparas sin corrección del factor de potencia) que

afectarían a la calidad del suministro eléctrico. Frente a ese problema, existen en el mercado métodos que permiten reducir considerablemente el impacto armónico de las lámparas. No obstante, la utilización de los procedimientos anteriores solo está regulada por las normas para las lámparas LED (o conjunto de lámparas LED) cuya potencia sea superior a 25 W quedando, para el resto de lámparas, a la elección del fabricante. En consecuencia, los factores de potencia de las lámparas pueden llegar a ser muy bajos ($FP = 0,6$ Figura 63) debido a distorsiones armónicas de la corriente muy elevadas ($THDi = 137\%$ Figura 63).

Derivado del análisis, estudio y programación de los circuitos anteriores se han empezado a desarrollar en el grupo de investigación de calidad del suministro eléctrico del Departamento de Ingeniería Eléctrica (QSE-UPC) modelos que permiten obtener la emisión de armónicos de las lámparas LED y pueden ser incorporados a programas de penetración de armónicos. Estos modelos se basan en el modelo de rectificador monofásico con filtro capacitivo ya desarrollado por el grupo QSE-UPC para los fluorescentes compactos pero introduciendo modificaciones en la modelización de la carga de continua que se alimenta después del condensador de filtrado del rectificador. En el caso de los fluorescentes compactos, dicha carga corresponde a un inversor que alimenta la lámpara a frecuencias próximas a 10-40 kHz de forma que el conjunto se comporta como una carga constante a la salida del rectificador y que puede ser modelizable con una resistencia. En el caso de las lámparas LED, se ha analizado a partir de los programas desarrollados en el presente trabajo que el conjunto formado por el driver y la cadena de LEDs se comporta como una fuente de corriente constante conectada a la salida del rectificador. También se ha comprobado que el comportamiento del conjunto puede ser modelado de forma más precisa añadiendo en paralelo con la fuente de corriente una resistencia de valor negativo. Estos estudios han quedado fuera del alcance del presente trabajo pero están siendo desarrollados actualmente por el grupo QSE-UPC a partir del análisis y las herramientas desarrolladas en él.

Un caso aparte son las lámparas LED con la regulación (dimming) de su intensidad de luz ya que además de la no linealidad introducida por el circuito electrónico que alimenta la cadena de LEDs existe la no linealidad intrínseca al circuito de regulación. Esta circunstancia hace que se deba de plantear un estudio similar, pero independiente, al anterior para caracterizar su comportamiento armónico y proponer modelos para su simulación en programas de penetración de armónicos. Este estudio ha quedado finalmente fuera del alcance del trabajo, el cual únicamente ha analizado y expuesto las configuraciones y circuitos de las lámparas LED regulables con el objetivo de que el estudio anterior pueda ser posteriormente utilizado para completar la caracterización de este tipo de lámparas.

Después de estudiar las lámparas LED a lo largo de este trabajo se puede concluir que es una tecnología de iluminación joven y en desarrollo. Estas lámparas utilizan diodos emisores de luz y dispositivos electrónicos para regular la corriente que circula por los diodos y existe en el mercado una amplia familia de diodos y controles para la regulación de su corriente (distintos tipos de convertidores mencionados a lo largo de este trabajo). La normativa para la limitación de emisiones de corriente armónica es la UNE-EN-IEC 61000-3-2, esta norma solo establece unas pautas para determinados casos, seguramente en el futuro sean necesarios ampliar los detalles de estas directrices para la correcta implantación de los sistemas LED en la iluminación.

4.2. Balance de objetivos

En general los objetivos principales se han conseguido abordar ofreciendo una visión global de la utilización de las lámparas LED y su tecnología. Además, se han realizado algunos programas que permiten estudiar el funcionamiento de algunos de los circuitos que conforman las lámparas LED.

Sin embargo, hubiese sido interesante haber podido extender esos objetivos y participar en el estudio y determinación del modelo armónico de las lámparas tomando como base el trabajo ya realizado.

También, habría sido interesante poder analizar los circuitos de las lámparas LED con regulación que, sin duda, supondrán un problema futuro en la calidad del suministro eléctrico.

4.3. Mejoras y trabajos futuros

Los trabajos futuros ya han sido comentados en los apartados anteriores y se resumirían en los siguientes puntos:

- Desarrollo de modelos para la simulación armónica de las lámparas LED y su incorporación a programas de penetración de armónicos y flujo armónico de cargas.
- Desarrollo de procedimientos de estimación para la determinación de los parámetros de los modelos anteriores.
- Estudio de las lámparas LED con regulación. Análisis de su comportamiento, desarrollo de modelos y estimación de sus parámetros.
- Estudio del impacto de la conexión masiva de las lámparas LED en las instalaciones eléctricas.

Bibliografía.

- [1] Manual de Luminotecnia 2002 Capitulo VIII, Dialux.
- [2] Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Iluminación.
- [3] PhD “Diseño y construcción de un balastro electrónico alimentado con DC para encender una lámpara fluorescente de 21 Watts”. Autor: Noé Márquez Avendaño, Universidad tecnología de la mixteca. Oaxaca.
- [4] PhD “Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y LEDs (Light Emitting Diodes)” Autor: Ana María Blanco Castañeda, Universidad Nacional de Colombia.
- [5] Manual de Iluminación Eficiente. Universidad Tecnológica Nacional. Libros Electrónicos [varios autores] (<http://www.edutecne.utn.edu.ar/>).
- [6] PhD “Caracterización armónica de dispositivos de iluminación de alta eficiencia energética” Autor: Julio Cesar Molina Guzmán. Director: Dr. Luis Sainz Saperá, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Barcelona-ETSEIB.
- [7] Guía de sustitución de lámparas Phillips “Lámparas que ahorran energía”, Alumbrado interior Abril 2011.
- [8] Comité Español de Iluminación-Eficiencia y ahorro energético. “Guía Técnica de Eficiencia Energética e Iluminación, Centros Docentes”. IDEA
- [9] Instalaciones Eléctricas De Interior Libre - Mc Graw Hill – Unidad 8 Luminotecnia. Dispositivos de alumbrado incandescente y fluorescente.
- [10] A Novel Passive Offline LED Driver With Long Lifetime. Autores: S. Y. (Ron) Hui, Fellow, IEEE, Si Nan Li, Xue Hui Tao, Wu Chen, Member, IEEE, and W. M. Ng, Member, IEEE.
- [11] LEDs as Energy Efficient Lighting Systems: A Detail Review. Autores: Sohel Uddin, Hussain Shareef, Azah Mohamed, M A Hannan and Khodijah Mohamed Department of Electrical, Electronics and System Engineering.
- [12] Design Procedure for a Compact Lamp Using High-Intensity LEDs. Autores: R. A. Pinto, M. R. Cosetin, T. B. Marchesan, M. F. da Silva, G. W. Denardin, J. Fraytag, A. Campos and R. N. do Prado.
- [13] An Analysis of Harmonics from LED Lamps. Autores: Sohel Uddin, Hussain Shareef, Azah Mohamed, M A Hannan.
- [14] An Analysis of Harmonic Diversity Factors Applied to LED Lamps. Autores: Sahel Uddin, Hussain Shareef, Member, IEEE, Azah Mohamed, Senior Member, IEEE, and M A Hannan, Member, IEEE.
- [15] Power driver topologies and control schemes for LEDs. Autores: Heinz van der Broeck, Georg Sauerlander, Matthias Wendt.

- [16] DC to DC Power for Driving LED-Backlit LCDs. Autores: Michael Keene, Design Engineer.
- [17] Driving High Power, High Brightness LEDs. Autores: Avago Technologies.
- [18] Efficient LED Driver with an Adaptive Reference Tracking Technique. Autores: Chun-Yu Hsieh, Young-Sheng Wei, Ke-Horng Chen, and Tseng-Chun Lin.
- [19] Review of Passive and Active Circuits for Power Factor Correction in Single Phase, Low Power ACDC Converters. Autores: H.Z.Azazi, E. E. EL-Kholy, S.A.Mahmoud and S.S.Shokralla.
- [20] A 1.2-A Buck-Boost LED Driver With On-Chip Error Averaged SenseFET-Based Current Sensing Technique. Autores: Sachin Rao, Student Member, IEEE, Qadeer Khan, Student Member, IEEE, Sarvesh Bang, Damian Swank, Arun Rao, William McIntyre, Member, IEEE, and Pavan Kumar Hanumolu, Member, IEEE.
- [21] A Modified Forward Converter with a Capacitive Output Filter for Isolated LED Lighting Applications. Autores: Myungbok Kim, Daeyoung Im.
- [22] Off-line LED driver for street lighting with an optimized cascade structure. Autores: D. Camponogara, G. F. Ferreira, A. Campos, M. A. Dalla Costa, J. Garcia.
- [23] Modelling of Compact Fluorescent Lamps. Autores: Z. Wei, Non-Member, N. R. Watson, Senior Member, IEEE, L. P. Frater, Member, IEEE.
- [24] Power Factor Correction (PFC) Application Notes. Autores: Coiltronics.
- [25] Microcontroller-based quadratic buck converter used as LED lamp driver. Autores: Aziz Elias Demian Junior, Jonas Reginaldo de Britto, Luiz Carlos de Freitas, Valdeir J. Farias, Ernane A. A. Coelho, João Batista Vieira Jr.
- [26] Analysis and Design of the Integrated Double Buck–Boost Converter as a High-Power-Factor Driver for Power-LED Lamps. Autores: J. Marcos Alonso, Senior Member, IEEE, Juan Viña, David Gacio Vaquero, Student Member, IEEE, Gilberto Martínez, and René Osorio.
- [27] Single-Stage Flyback Converter for Constant Current Output LED Driver with Power Factor Correction. Autores: Tzuen-Lih Chern, Li-Hsiang Liu, Ping-Lung Pan, Yi-Jie Lee.
- [28] An Analysis of Harmonics from Dimmable LED Lamps. Autores: Sohel Uddin, Hussain Shareef, Member, IEEE, Azah Mohamed, Senior Member, IEEE, and M A Hannan, Member, IEEE.
- [29] Dimming LED Lighting. Autores: AEG Power Solutions.
- [30] Introduction to Light Emitting Diodes (LEDs).
- [31] A Primary-Side Control Scheme for High-Power-Factor LED Driver With TRIAC Dimming Capability. Autores: Junming Zhang, Member, IEEE, Hulong Zeng, and Ting Jiang.

[32] Off-the-Line Primary Side Regulation LED Lamp Driver With Single-Stage PFC and TRIAC Dimming Using LED Forward Voltage and Duty Variation Tracking Control. Autores: Jong Tae Hwang, Moon Sang Jung, Dae Ho Kimt, Jun Hong Lee, Min Ho Jung, and Jong Ha Shin.

[33] Simple TRIAC dimmable LED driving solution free of large passive input filter, DC bus capacitor or bleeding resistor. Autores: Yanjun Shi, Bangyin Liu and Shanxu Duan.

[34] Input Filter Design for TRIAC Dimmable LED Lamps. Autores: Montu Doshi and James Patterson.

[35] Bilevel Current Driving Technique for LEDs. Autores: Wai-Keung Lun, Student Member, IEEE, K. H. Loo, Member, IEEE, Siew-Chong Tan, Member, IEEE, Y. M. Lai, Member, IEEE, and Chi K. Tse, Fellow, IEEE.

[36] Effects of High Penetration of CFLs and LEDs on the Distribution Networks. Autores: A. M. Blanco and E. E. Parra.

Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia

Acta d'Avaluació de Projecte

Curs:
Codi UPC: **33563**

Data defensa:

Qualificació:

Alumne: Roberto Rivera Sierra

DNI: 72538439G

Títol: Estudio del estado del arte de las lámparas de iluminación LED y su comportamiento armónico

Director: Luis Sainz Sopera

Director:

Ponent: Roberto Rivera Sierra

Tribunal

President:

Vocals:

Suplents:

Observacions

Signatura

Convocatòria Ordinària,	Convocatòria Extraordinària,
Cognoms, nom (President)	Cognoms, nom (President)
Cognoms, nom (Vocal)	Cognoms, nom (Vocal)
Cognoms, nom (Vocal)	Cognoms, nom (Vocal)