

FUENTE DE ALIMENTACION PARA UNA LAMPARA FLUORESCENTE

ALVARO ALFONSO SUAREZ VEGA
YUBER HERNAN CAMARGO DIAZ

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES
FACULTAD INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERIA ELECTRONICA
BOGOTÁ, D.C.
2014

FUENTE DE ALIMENTACION PARA UNA LAMPARA FLUORESCENTE

ALVARO ALFONSO SUAREZ VEGA
YUBER HERNAN CAMARGO DIAZ

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director:

Jhon Fredy Bayona Navarro
MS(c) Ingeniero Electrónico

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES
FACULTAD INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERIA ELECTRONICA
BOGOTÁ D.C.

2014

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 28 de Febrero de 2014

DEDICATORIA

A nuestras familias, quienes nos apoyan incondicionalmente moral y anímicamente en todas las actividades diarias y académicas.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios, que nos brinda la oportunidad y la fortaleza para desarrollar las actividades necesarias para llevar a cabo todos los proyectos, incluyendo el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Jhon Bayona, por su buena asesoría académica, por brindarnos todos sus conocimientos y por ser una guía de gran ayuda durante el desarrollo de este proyecto.

A todos los profesores que han hecho parte de nuestra formación durante toda la carrera; de todos y cada uno de ellos se ha aprendido cosas bastante valiosas, las cuales nos han servido como visión global para ejecución de este trabajo.

Contenido

RESUMEN.....	12
INTRODUCCION	13
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
LAMPARAS FLUORESCENTES	16
1.1 ANTECEDENTES.....	16
1.2 CARACTERISTICAS DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES	17
1.3 TIPOS DE LAMPARAS DE DESCARGA.....	19
1.3.1.1 LAMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE BAJA PRESION	20
1.3.1.2 LAMPARAS DE VAPOR DE SODIO A ALTA PRESION	20
1.3.2 LAMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO.....	21
1.3.2.1 LAMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO A ALTA PRESION	21
1.3.2.1.1 LAMPARAS CON HALOGENUROS METALICOS	21
1.3.2.1.2 LAMPARAS DE LUZ DE MEZCLA	22
1.3.2.2 LAMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO DE BAJA PRESIÓN	22
1.4 DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES	22
<u>INVERSORES RESONANTES</u>	<u>26</u>
2.1 TIPOS DE INVERSORES	29
2.1.1 INVERSOR RESONANTE EN SERIE (IRS).....	30
2.2.1 INVERSORES RESONANTES (DC/AC) CON CONMUTACIÓN SUAVE.....	32
2.2.2 INVERSORES RESONANTES EN SERIE DE MEDIO PUENTE.....	33
2.2.3 INVERSOR RESONANTE SERIE PUENTE COMPLETO	35
2.3 TANQUE RESONANTE.....	36
2.3.1 REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR UN TANQUE RESONANTE.....	38
2.3.1.1 ENTREGAR UNA SEÑAL ALTERNA Y SIMETRICA	38
2.3.1.2 SUMINISTRAR EL VOLTAJE ADECUADO DE ENCENDIDO	39
2.3.1.3 LIMITAR LA CORRIENTE DE CARGA.....	40
<u>DISEÑO Y ANALISIS DEL INVERSOR RESONANTE</u>	<u>41</u>
3.1 RESISTENCIA DE LA LAMPARA	41
3.2 FACTOR Q:	42
3.3 DISEÑO DEL INVERSOR	43
3.3.1 ETAPA DE CONMUTACION	44

3.3.2 ETAPA DEL TANQUE RESONANTE	44
3.3.2.1 ECUACION PARA EL CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA.....	46
3.3.2.2 ECUACION PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA	46
3.3.3 FUNCIONAMIENTO	47
3.4 CIRCUITO DE ARRANQUE DE LA LAMPARA FLUORESCENTE.....	49
3.5 INVERSOR CON TANQUE LCC.....	50
<u>RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACION</u>	<u>52</u>
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS	53
CONCLUSIONES	59
TRABAJO FUTURO.....	60
BIBLIOGRAFÍA	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1.1. Espectro electromagnético	18
Figura 1.2. Respuesta del ojo humano a la luz de varias longitudes de onda.	19
Figura 1.3. Lámparas fluorescentes.	23
Figura 1.4. Funcionamiento y estructura de una lámpara de vapor de mercurio a baja presión.	24
Figura 2.1. Diagrama en bloques simplificado de un inversor resonante.	27
Figura 2.2. Inversor resonante en serie de medio puente.	29
Figura 2.3. Diagrama por etapas de un inversor resonante en serie.	31
Figura 2.4. Inversor con tanque resonante serie LC.	33
Figura 2.5. Circuito equivalente en términos de fasores de un circuito RLC, de un tanque resonante en serie.	34
Figura 2.6. Circuito SRC en configuración FB (Puente Completo).	36
Figura 2.7. Tanque resonante LC en serie.	37
Figura 2.8. Relación de señal de entrada (cuadrada) y señal de salida (sinusoidal)	39
Figura 3.1. Resistencia característica de la lámpara en función de la potencia.	42
Figura 3.2. Etapa de conmutación.	44
Figura 3.3. Circuito tanque en función de fasores.	45
Figura 3.4. Circuito del tanque resonante LC serie.	47
Figura 3.5. Inversor con tanque resonante LC en serie cuando Q_1 está activo.	48
Figura 3.6. Inversor con tanque resonante LC en serie cuando Q_2 está activo.	48
Figura 3.7. Circuito de ignición de la lámpara, en configuración puente H.	50
Figura 3.8. Inversor resonante con tanque LCC.	51
Figura 4.1. Circuito completo del inversor resonante con el tanque en serie y la etapa de ignición.	52
Figura 4.2. Voltajes en los inversores LC y LCC.	53
Figura 4.3. Corriente en los tanques LC y LCC	54

Figura 4.4. Voltajes en la lámpara de 32W.	55
Figura 4.5. Corriente y voltaje en la lámpara.	55
Figura 4.6. Voltaje de ignición y en estado estable.	56
Figura 4.7. Voltaje de la lámpara en estado estable	57
Figura 4.8. Corriente de la lámpara en estado estable.	57

GLOSARIO

AC: señal de voltaje alterna simétrica.

LC: circuito conformado por una inductancia y una capacitancia en serie.

LCC: circuito compuesto por una inductancia y una capacitancia en serie con una capacitancia en paralelo a la lámpara.

EMI: interferencia electromagnética (del inglés Electromagnetic Interference).

PFC: corrector de factor de potencia (del inglés Power Factor Correction).

ICS: conformación de corriente de entrada (del inglés Input Current Shaping).

DC/AC: corriente directa/corriente alterna (del inglés Direct current / Alternate Current).

nm: medida de longitud en nanómetros.

ZCS: conmutación en corriente cero (del inglés Zero Current Switching).

ZVS: conmutación en voltaje a cero (del inglés Zero Voltage Switching).

IRS: inversor resonante en serie.

SRC: inversor resonante serie (del inglés Serie Resonant Converter).

FB: configuración en puente completo (del inglés Full-Bridge).

HB: configuración en medio puente (del inglés Half-Bridge).

Q : factor de calidad.

$f_s N$: Frecuencia de Switcheo (conmutación) Normalizada.

PWM: modulación por ancho de pulso (del inglés Pulse Width Modulation).

T_s : período de conmutación.

f_0 : frecuencia de resonancia del tanque.

f_s : frecuencia de conmutación de los transistores mosfet.

ω_0 : frecuencia de resonancia del inversor.

D: ciclo útil de una señal cuadrada.

γ : longitud de onda de la señal de salida.

X_c : reactancia capacitiva.

X_l : reactancia Inductiva.

V_{Lam} : voltaje de operación de la lámpara.

R_{Lam} : resistencia equivalente de la lámpara.

P_{Lam} : potencia de la lámpara.

R_{eq} : resistencia equivalente de la lámpara.

R-L-C: circuito eléctrico en configuración: Resistor-Bobina-Capacitor.

Q1: transistores mosfet (IRF840, para este caso).

V_y : señal resultante de la etapa de conmutación.

V_{cc} : Voltaje Fuente corriente continua.

V_o : Voltaje de salida (en la lámpara).

V_{pp} : magnitud de voltaje pico a pico de una onda sinusoidal.

C_a : Condensador de filtrado para el circuito de ionización.

KHz: medida de frecuencia en Kilo-Hertz.

W: medida de potencia en vatios.

RESUMEN

La utilización de inversores resonantes, que operan a frecuencias altas (mayores a 40KHz) para alimentar lámparas fluorescentes ha venido aumentando porque se obtienen varias ventajas frente a los balastos comunes; algunas de estas son: permite eliminar el molesto y nocivo efecto estroboscópico, ya que estas frecuencias de operación son altas, por tal razón el ojo humano no puede percibir los cambios de ionización de la luminaria [20], reducción en el tamaño y peso del inversor [1, 10]. En este trabajo se muestra el análisis de un inversor con tanque resonante LC serie, los cálculos necesarios para implementar el inversor, la simulación de la fuente de alimentación operando con el inversor resonante y los resultados obtenidos, tanto en las pruebas experimentales como en el funcionamiento del circuito conectado a la lámpara fluorescente.

Las lámparas fluorescentes son utilizadas en un gran porcentaje de la demanda total de la iluminación artificial, en todo el mundo [10, 12]. Esta es la razón por la cual la electrónica de potencia se ha convertido en materia importante en el estudio y desarrollo de nuevos productos que permitan alimentar este tipo de lámparas, de tal forma que se pueda hacer uso eficiente de esta forma de iluminación [11]. El balasto electrónico es un circuito de potencia desarrollado para utilizarse en la alimentación de las lámparas fluorescentes, que busca la optimización del uso de la energía y la eliminación del efecto estroboscópico presente cuando se utiliza un balasto común o magnético [8, 11].

INTRODUCCION

Este trabajo se basa en el análisis e implementación de un inversor con tanque resonante LC en serie. También se hace una comparación con un inversor resonante LCC, donde se demuestran las ventajas en cuanto a eficiencia energética del balasto electrónico con tanque LC serie.

En la primera parte se realiza un recuento acerca de las lámparas fluorescentes y sus características físicas y de funcionamiento. En el capítulo 2 se describen los inversores resonantes, tipos y topologías. Los cálculos y el diseño del inversor propuesto, se abarcan en el capítulo 3, para finalizar, se presentan los resultados del trabajo en el capítulo 4.

La utilización de balastos electrónicos para alimentar lámparas de descarga, tiene grandes ventajas en cuanto a su alta eficiencia energética, reducción de tamaño, menor peso e incremento en el tiempo de vida útil, con respecto a los balastos magnéticos [20]. Por otro lado en los balastos electrónicos surgen algunos inconvenientes con respecto a la calidad de la línea de alimentación e interferencia electromagnética (EMI), cuando surge un simple pico en el circuito rectificador que se utiliza [20, 10]. Por lo cual es necesario implementar técnicas de corrección de factor de potencia (PFC, de "Power Factor Correction") o conformación de corriente de entrada (ICS de Input Current Shaping") [20].

El uso eficiente de la energía, ha sido un tema de estudio y de gran importancia en los últimos años [5]. La iluminación artificial hace parte de la preocupación global por reducir el consumo innecesario de recursos, el cuidado y preservación del planeta [2].

Es una de las razones por las cuales se viene reemplazando el uso de lámparas incandescentes por las lámparas fluorescentes en la industria y el hogar. Las

primeras presentan un uso deficiente de la energía porque el 70% es disipado en forma de calor y solo el 30% es convertido en forma de luz. Mientras que las lámparas fluorescentes presentan grandes ventajas por su buena relación lúmenes/vatios [4]. Lo que presenta, claramente, a las lámparas fluorescentes como la mejor opción en la reducción del costo de operación [5].

La utilización de lámparas fluorescentes en espacios de entorno, como en espacios públicos, ha venido creciendo considerablemente en los últimos años [9]. La utilización de estas, presenta ventajas frente a otras lámparas como las incandescentes y las bombillas de tungsteno [1]. El uso de lámparas fluorescentes otorga una buena opción para la iluminación, presentando el mismo nivel de iluminación que otras lámparas y teniendo un menor consumo de energía [4].

La finalidad del proyecto se basa en la búsqueda de mejorar la eficiencia energética de los sistemas de iluminación artificial, a partir del análisis, diseño e implementación de un inversor resonante en serie [7].

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, simular e implementar un inversor resonante DC/AC en serie para alimentar una lámpara fluorescente de 60 vatios.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar los cálculos necesarios para un inversor resonante en serie que pueda alimentar una lámpara fluorescente de 60 vatios.

Simular el inversor resonante en serie para la comprobación de su funcionamiento.

Diseñar e implementar el prototipo del inversor resonante en serie que tenga la capacidad de alimentar una lámpara fluorescente de 60 vatios.

DELIMITACIÓN

El proyecto se fundamenta en el análisis, diseño e implementación de un inversor resonante en serie para alimentar una lámpara fluorescente de 60 vatios.

Este proyecto se limita a la implementación del prototipo de un inversor resonante.

Para la implementación y funcionamiento del inversor resonante se cuenta con un rectificador conmutado con corrección de potencia de 100 vatios a 450 voltios.

El tiempo estimado para el desarrollo y la implementación del proyecto es de seis meses.

Capítulo 1

LAMPARAS FLUORESCENTES

1.1 ANTECEDENTES

El uso de tecnologías de alta eficiencia, se ha venido promoviendo a nivel internacional en los últimos años, en busca del cuidado del medio ambiente [7,15]. Varios países, incluyendo a Colombia, vienen incentivando la producción, comercialización e implementación de lámparas fluorescentes en el sector residencial e industrial [15].

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia, según el decreto 3450 de 2008, informa que a partir del 1 de enero de 2011, en Colombia no se podrán utilizar lámparas de baja eficiencia, por lo cual se espera que las personas cambien las bombillas incandescentes por lámparas fluorescentes [15].

La necesidad de utilizar lámparas fluorescentes ha venido creciendo debido a que se busca mejorar la eficiencia en cuanto a un bajo consumo y una iluminación adecuada [7].

1.2 CARACTERISTICAS DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES

La eficiencia y larga vida, destacan las lámparas fluorescentes por encima de las lámparas incandescentes. La utilización de estas lámparas en espacios abiertos y cerrados marca una tendencia a nivel mundial desde hace varios años [1,3]. Dependiendo del lugar donde se instalen dichas lámparas, se puede regular su intensidad, según la luz natural a la cual estén expuestas en el lugar de su instalación; lo que significa una buena optimización en el consumo de la energía eléctrica [6].

Se tienen varias ventajas cuando se decide utilizar lámparas fluorescentes, debido a su eficiencia luminosa, mayor tiempo de servicio, buena depreciación de lúmenes y rendimiento del color [20]. La eficiencia luminosa es la forma en que se mide la capacidad de una lámpara para convertir una potencia eléctrica, medida en vatios, a flujo luminoso en la salida; esta relación se mide en lúmenes por vatio (lúmenes/vatio) [20, 6]. El flujo luminoso de una fuente de luz se define como la radiación electromagnética que está en el rango de la parte visible del espectro electromagnético, en referencia con la sensibilidad del ojo humano para detectar esa porción visible del espectro. Aproximadamente, el ojo humano puede percibir la luz dentro de un rango de longitud de onda de 380 nm a 780 nm [20, 12], como se ilustra en la figura 1.1.

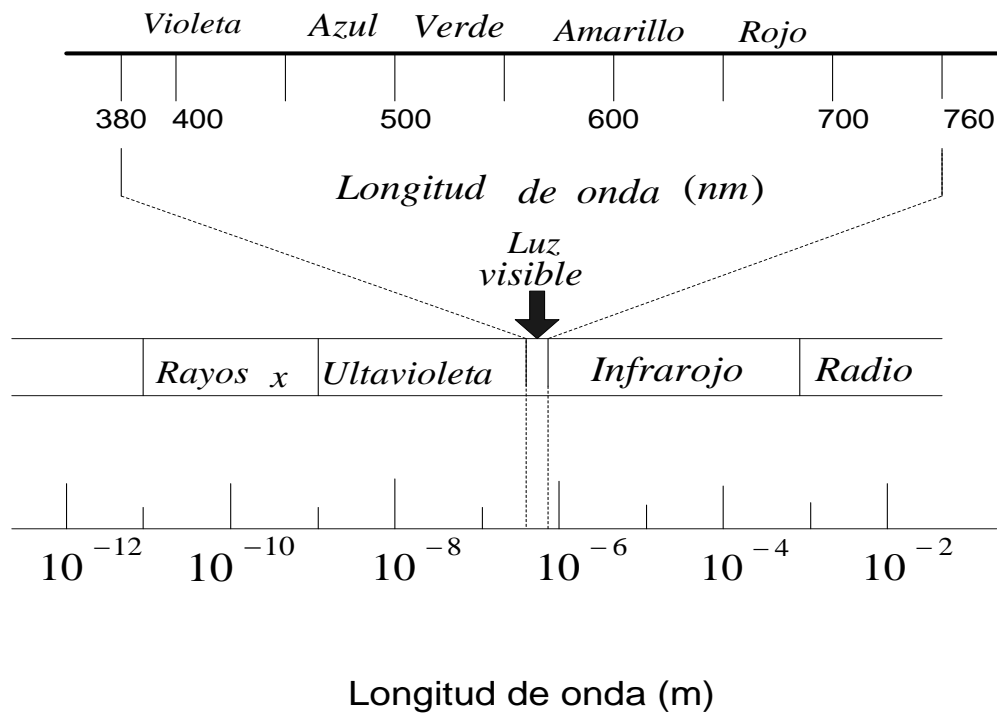


Figura 1.1. Espectro electromagnético.

Dentro del rango de estas longitudes de onda (380 nm a 780 nm), que el ojo humano es capaz de percibir, se encuentra la discriminación para identificar la diferencia entre los colores [20]. Sin embargo no todas las personas pueden captar la luz dentro de este rango; por lo general este oscila entre los 400 nm y 700 nm. De cualquier manera no se encuentran disponibles todos los colores que los ojos y el cerebro puedan distinguir dentro del espectro visible porque algunos necesitan la mezcla de múltiples longitudes de onda, como es el caso, por ejemplo, del magenta, el rosado, el marrón, donde se requieren combinar los rojos oscuros [2, 5, 9]; como se puede apreciar en la Figura 1.2.

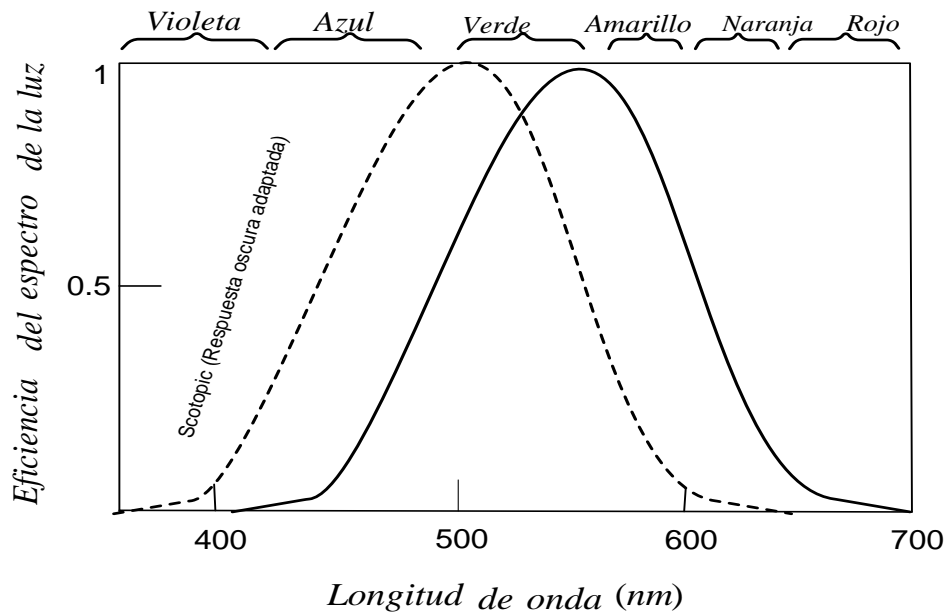


Figura 1.2. Respuesta del ojo humano a la luz de varias longitudes de onda.

1.3 TIPOS DE LAMPARAS DE DESCARGA

En la actualidad se fabrican cerca de 6000 tipos de lámparas, las cuales pueden ser clasificadas en seis categorías, que son: Lámparas incandescentes, fluorescentes, de vapor de mercurio, vapor de sodio a baja presión, vapor de sodio a alta presión y lámparas de halogenuros metálicos [1, 20].

En este trabajo se utilizan lámparas de vapor de mercurio. A continuación se explican unas de las características de algunos de los tipos de lámparas; que en forma general se pueden agrupar en: Lámparas de vapor de sodio y lámparas de vapor de mercurio.

1.3.1 LAMPARAS DE VAPOR DE SODIO

Las lámparas de vapor de sodio también se clasifican en dos tipos, los cuales son: Lámparas de vapor de sodio a baja presión y Lámparas de vapor de sodio a alta presión [18].

1.3.1.1 LAMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE BAJA PRESION

Este tipo de lámparas se componen de una ampolla de vidrio tubular y un tubo de descarga en forma de 'U', la cual contiene una cantidad pequeña de gas de neón y unas gotas de sodio puro. En los extremos del tubo se ubican dos electrodos de wolframio [21].

El funcionamiento de este tipo de lámparas se basa en aplicar cierto voltaje entre los electrodos, lo cual hace que haya una descarga a través del gas de neón, produciendo una emisión de luz roja, que es una de las características del gas de neón. El sodio se evapora al estar sometido al calor que produce la descarga, de tal manera que se produce una luz monocromática de color amarillo con una longitud de onda de 589 nm [18, 21].

1.3.1.2 LAMPARAS DE VAPOR DE SODIO A ALTA PRESION

En las lámparas de vapor de sodio se hace básicamente una mejora de las lámparas de vapor de sodio de baja presión, con la diferencia que en el interior aumenta la presión del vapor de sodio y se adiciona un gas xenón y mercurio en pequeñas cantidades para mejorar el espectro. En el interior de una ampolla está ubicado el tubo de descarga, para ser protegido de la intemperie, además sirve de aislamiento eléctrico y térmico. La ampolla es transparente ya que estas lámparas emiten pocas radiaciones ultravioleta [18, 19, 21].

1.3.2 LAMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO

Las lámparas de vapor de mercurio se dividen en dos ramas: las lámparas de vapor de mercurio a alta presión (lámparas con halogenuros metálicos, lámparas de luz de mezcla) y las lámparas de vapor de mercurio de baja presión (lámparas fluorescentes) [9].

1.3.2.1 LAMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO A ALTA PRESION

Este tipo de lámparas se conoce comúnmente como lámparas de vapor de mercurio, poseen características similares a las lámparas fluorescentes, en lo que se enmarca a la emisión de radiaciones ultravioleta con altas presiones de vapor. Este tipo de lámparas emite diferentes bandas que corresponden a los colores: amarillo (570 nm), verde (546 nm), azul (435 nm) y el violeta (405 nm) [20].

Debido a esas cualidades cromáticas, los resultados de estas radiaciones no son adecuadas ya que se ausenta el espectro del color rojo; por esta razón se debe transformar esa radiación ultravioleta al espectro rojo por medio de sustancias fluorescentes, obteniendo una mejora en el resultado cromático [19, 20].

1.3.2.1.1 LAMPARAS CON HALOGENUROS METALICOS

Las lámparas de halogenuros metálicos contienen, además del vapor de mercurio a alta presión, diversos componentes químicos de halogenuros de tierras raras como el tulio, talio, indio, holmio o disprosio; con lo cual se mejora el rendimiento luminoso y lo más importante es que se obtiene mejores reproducciones cromáticas [7].

Está compuesta por una ampolla exterior de vidrio resistente que se usa para aislar y mantener el equilibrio térmico del tubo, el cual es un tubo de descarga

hecho de cuarzo y dos electrodos de wolframio que se ubican en cada punta del tubo [9, 21].

1.3.2.1.2 LAMPARAS DE LUZ DE MEZCLA

Este tipo de lámparas son derivadas de las lámparas de mercurio de alta presión, con una diferencia principal que se fundamenta en que en las lámparas de mercurio se requiere de un balasto externo para poder mantener una corriente estable, y en las lámparas de mezcla el balasto es ubicado interiormente en forma de un filamento de tungsteno [19, 21].

1.3.2.2 LAMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO DE BAJA PRESIÓN

Estas son conocidas comúnmente como lámparas fluorescentes, las cuales se encuentran en dos tipos: lámparas de arranque instantáneo, las cuales tienen dos terminales, que se ubican uno en cada extremo; y las de arranque rápido, que son conformadas por 4 terminales distribuidos en los dos extremos del tubo de descarga [18, 21].

Debido a que este trabajo se fundamenta en el diseño e implementación de un inversor resonante para alimentar una lámpara fluorescente, a continuación se presenta una breve descripción de algunas de las características y funcionamiento de las lámparas fluorescentes, en las cuales se ha enfocado este trabajo.

1.4 DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES

Las lámparas fluorescentes se componen, normalmente de vapor de mercurio a baja presión. Estas son utilizadas con mayor frecuencia en iluminación doméstica y en la industria. Una ventaja principal radica en su eficiencia energética [9].

En la figura 1.3 se ilustra una imagen de dos tubos fluorescentes de 32 vatios, en funcionamiento.



Figura 1.3. Lámparas fluorescentes.

Se componen de un bulbo fino de vidrio revestido interiormente con diferentes sustancias químicas compuestas llamadas fósforo, aunque este elemento químico no está presente normalmente en estos compuestos, por lo tanto no se debe confundir con dicho elemento. Los compuestos químicos emiten luz visible al recibir una radiación electromagnética [15].

La figura 1.4 describe el funcionamiento de una lámpara tubular. Se compone de dos electrodos ubicados, cada uno en un extremo. Si se aplica un voltaje determinado a estos electrodos, se genera un arco eléctrico producido por la corriente que circula a través del gas de mercurio, de extremo a extremo [18, 19]. Los átomos de mercurio al ser excitados, producen radiación ultravioleta, la cual choca con la capa de sustancias químicas presentes en las paredes del tubo

(llamada: capa fluorescente), que hacen que esta radiación invisible aumente la longitud de onda y se transforme en una onda que está dentro del espectro visible al ojo humano [15].

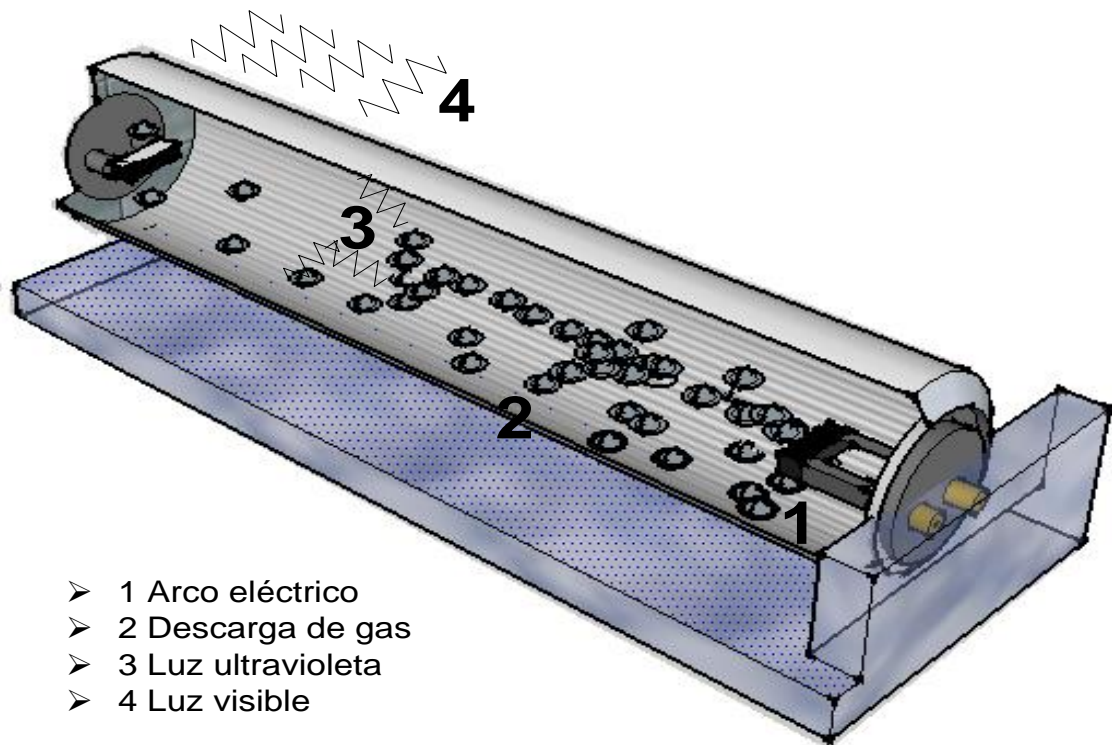


Figura 1.4. Funcionamiento y estructura de una lámpara de vapor de mercurio a baja presión.

La primera de las fuentes de alimentación estudiadas para estas lámparas se compone de un convertidor conmutado con corrección de factor de potencia conectado en cascada con un convertidor de medio puente. Esta propuesta permite regular la intensidad lumínica mediante la modulación del segundo convertidor [20, 21].

Se ha implementado otro tipo de modulaciones para estas lámparas, como es el caso de la modulación por ancho de pulso asimétrico, la cual permite regular la tensión entregada a la carga con corrección de factor de potencia [16].

Proveer una fuente de alimentación para múltiples lámparas fluorescentes también ha sido tema de estudio [24, 25]. La conexión de un convertidor conmutado con corrección de factor de potencia y un convertidor resonante en puente completo describen la fuente de alimentación [5, 7 20]. La aplicación de diferentes modulaciones sobre las topologías sin que se tenga pérdida de eficiencia, caracteriza esta propuesta [7, 9].

Hoy en día se manejan fuentes de alimentación para este tipo de lámparas que se componen de un método de corrección de factor de potencia, conmutación suave y baja emisión electromagnética [16].

Capítulo 2

INVERSORES RESONANTES

El objetivo principal de un inversor resonante es convertir una señal de voltaje DC (V_{cc}), a una señal de voltaje alterna simétrica (AC) (V_{Lam}) [10, 14]. La señal sinusoidal de salida puede controlarse por su magnitud, fase y/o frecuencia [14]. En el caso que se modifique el voltaje DC de entrada y se mantengan los parámetros de ganancia del inversor, se puede obtener una variación del voltaje de salida; a su vez, si el voltaje de entrada no es controlable y se requiere una salida ajustable, se puede manipular la ganancia del inversor, lo cual se consigue variando el ancho de pulso (PWM) en el interior del inversor [1, 10]. La relación que existe entre el voltaje de salida en AC y el voltaje de entrada en DC, se define como la ganancia del inversor [12, 14].

La señal de salida de los inversores resonantes ideales, es simétrica; sin embargo en la realidad, las ondas que se aplican a la carga, no lo son, y poseen armónicos [10, 20]. En algunas aplicaciones se puede aceptar formas de onda casi cuadradas, aunque en aplicaciones de alta potencia, se requiere de señales sinusoidales y con poca distorsión armónica [14].

De esta forma se deben tener en cuenta algunos parámetros de diseño, los cuales se basan en normas y requerimientos. Los criterios para tener en cuenta cuando se desea implementar inversores resonantes son: su eficiencia energética, factor de cresta, factor de potencia y distorsión armónica [15, 19].

En un inversor se requiere contar con un sistema adecuado de conmutación para lograr que se presente la menor pérdida posible de potencia a causa de la conmutación en los Mosfet. En los instantes de “apagado” y “encendido” de los dispositivos de conmutación, se puede presentar gran pérdida de potencia cuando la tensión y la corriente adquieren valores diferentes de cero [10].

En la figura 2.1 se ilustra el esquema en bloques, simplificado, de un inversor resonante; se observa una potencia de entrada al inversor, la potencia de salida, un sistema de control sobre el inversor resonante y la etapa del inversor resonante, donde se incluye la etapa de conmutación y el tanque resonante.

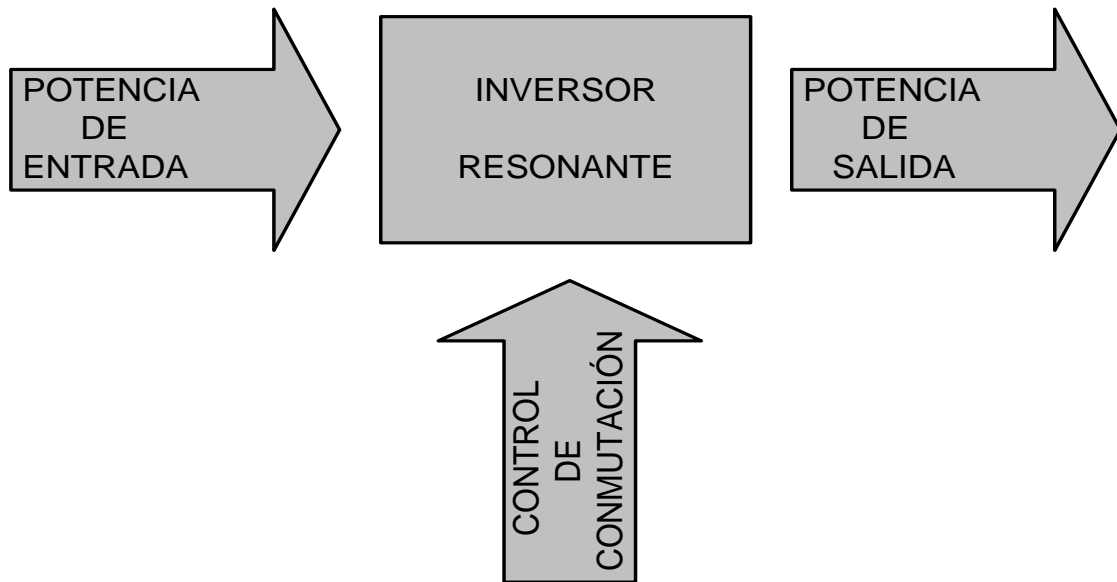


Figura 2.1. Diagrama en bloques simplificado de un inversor resonante.

Logrando que la conmutación se presente cuando la tensión y/o la corriente sean iguales a cero o tomen valores muy cercanos a cero, se consigue que las pérdidas de conmutación disminuyan, debido a que las transiciones de tensión y corriente no se hacen de forma simultánea [10].

Para mejorar estas pérdidas se propone aumentar la frecuencia de conmutación, lo que a su vez, ofrece una mejora en el tamaño y peso de los componentes activos del inversor; pero por otra parte el aumento de la frecuencia hace que las pérdidas por conmutación se presenten más rápidamente en el dispositivo [14].

Teniendo en cuenta la frecuencia de resonancia; a mayor frecuencia de operación, se obtienen diferentes ventajas: menor tamaño del circuito, más livianos los elementos reactivos, mejor respuesta dinámica a cambios rápidos en la corriente de carga y/o tensión de entrada [1, 3, 6]. Por esta razón se requiere de sistemas de alimentación para lámparas fluorescentes, que implementen inversores operando a alta frecuencia para maximizar la eficiencia lumínica [5,10].

Dentro de las investigaciones de inversores DC/AC, se desarrollan diferentes topologías cuyas formas de onda de voltaje o corriente son sinusoidales, con lo que se consigue reducir significativamente las pérdidas de conmutación y se puede obtener una baja EMI [2].

En la figura 2.2 se muestra el circuito de un inversor resonante en serie en configuración de medio puente. Este es uno de los tipos de convertidores más utilizados para alimentar lámparas de descarga [9]; en la figura se puede apreciar que se constituye por la fuente de voltaje DC, el segmento de conmutación, el tanque resonante LC serie y la carga (que representa la lámpara fluorescente).

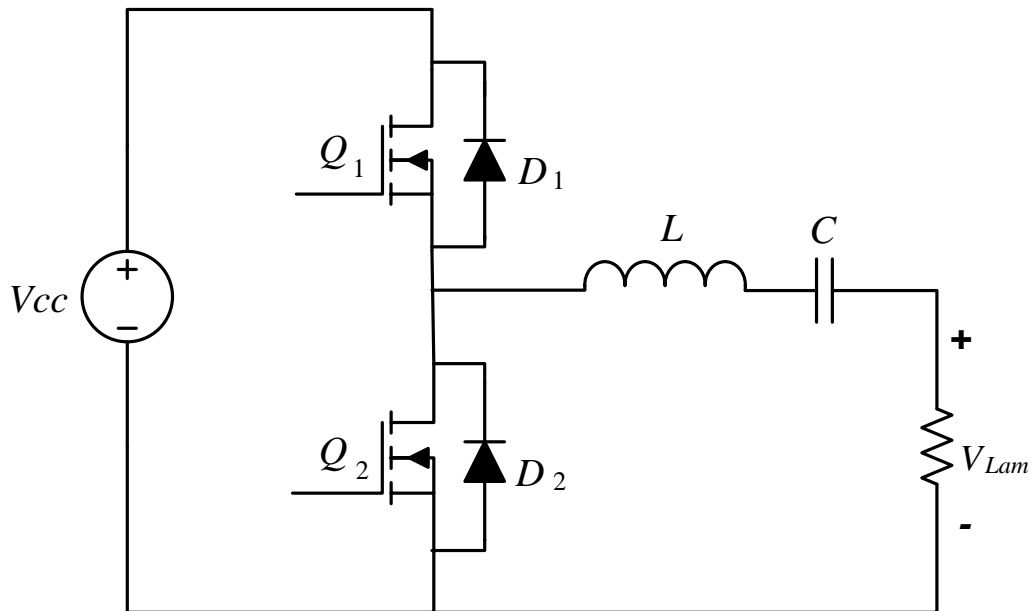


Figura 2.2. Inversor resonante en serie de medio puente.

2.1 TIPOS DE INVERSORES

Las topologías utilizadas en los balastos electrónicos para alimentación de las lámparas fluorescentes, se dividen básicamente en dos grupos: (1) alimentados por voltaje y (2) alimentados por corriente [14, 1].

Los circuitos alimentados por corriente, presentan mayor dificultad en el diseño y análisis frente a los alimentados por voltaje, sin embargo en casi todas las topologías se puede encontrar que las pérdidas de potencia en la conmutación sean nulas. Adicionalmente se necesita de una bobina extra que suministre corriente a la topología y normalmente los esfuerzos de voltaje y corriente son superiores en los elementos de conmutación [12, 14, 18].

En los balastos electrónicos para alimentar lámparas fluorescentes, se utilizan comúnmente los inversores alimentados por tensión, debido a que estas topologías facilitan el análisis y diseño; además en la mayoría de los balastos electrónicos se utiliza una señal cuadrada de forma unipolar o bipolar que se inyecta a un tanque resonante, el cual se debe sintonizar lo más cercano posible a la frecuencia de conmutación, con el fin que en la lámpara se experimente únicamente la frecuencia fundamental de la señal cuadrada aplicada [5, 6].

Dentro de los inversores resonantes se puede encontrar varias topologías y tipos, según los requerimientos de potencia y frecuencia. En este trabajo se pretende explicar algunas de las topologías alimentadas por tensión, como son: inversor resonante en serie, inversor resonante en serie con conmutación suave, inversor resonante de medio puente, inversor resonante de puente completo.

2.1.1 INVERSOR RESONANTE EN SERIE (IRS)

El inversor resonante en serie, llamado también Convertidor Resonante en Serie SRC (de Serie Resonant Converter) fue introducido por primera vez por Schwarz, el cual se presenta en dos configuraciones básicas: Puente completo o FB (Full-Bridge) y Medio Puente o HB (Half-Bridge) [14, 15], la diferencia entre las dos topologías presentes es:

- En el caso de FB utiliza cuatro interruptores y en el caso de HB se utilizan dos.
- El voltaje de salida de un inversor en medio puente (HB) es la mitad, en comparación con el voltaje de salida de un inversor en configuración puente completo (FB) [10].

El inversor resonante en serie (SRC o IRS) es una aplicación de los inversores resonantes, el cual presenta una inductancia y una capacitancia en serie con la

carga, con el fin de lograr un circuito sub-amortiguado [12]. En los interruptores se genera una señal cuadrada; la combinación de condensador y bobina se hace de tal forma que la frecuencia de resonancia sea igual que la frecuencia de conmutación [10].

La operación del SRC se basa en tres parámetros: el parámetro de carga Q , la frecuencia de conmutación normalizada $f_s N$, que es la relación entre la frecuencia de conmutación f_s y la frecuencia de resonancia f_0 , y la relación de ciclo útil D . Para la eliminación deseada de los armónicos en la carga, se elige un parámetro de carga Q alto [17]. La frecuencia de conmutación normalizada $f_s N$, determina los rangos de frecuencia en los que opera el SRC [10, 14].

Los inversores resonantes con un factor de calidad lo necesariamente grande, presentan una solución importante en diversas aplicaciones en cuanto a iluminación artificial en la industria, oficinas y hasta en el hogar; gracias a que la implementación de estos inversores presenta ventajas en cuanto a un tamaño reducido, mejor respuesta a cambios rápidos en la corriente de carga y también en la tensión de entrada [11].

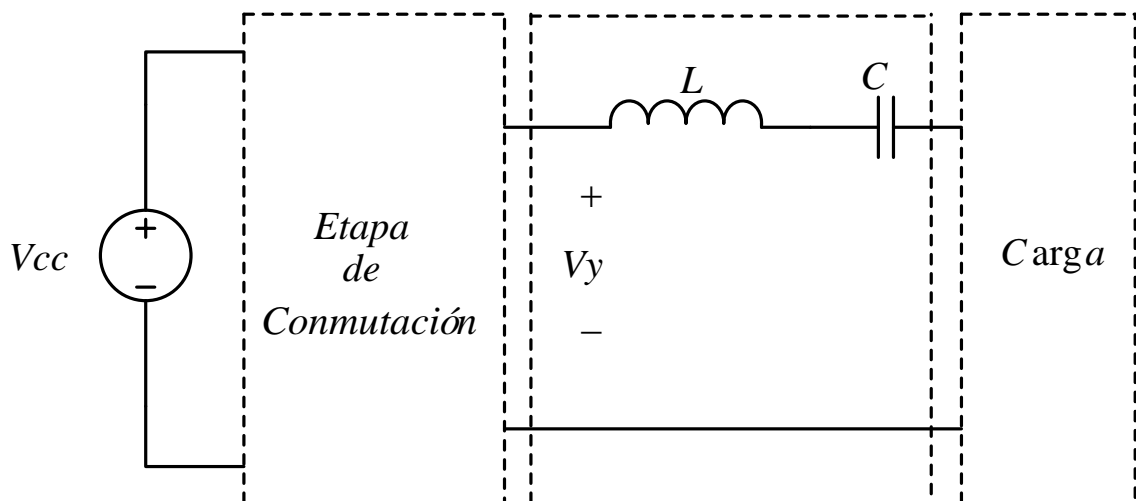


Figura 2.3. Diagrama por etapas, de un inversor resonante en serie.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama de un inversor resonante en serie, por etapas, donde la etapa de conmutación puede tener varias configuraciones y la carga depende del diseño que se realice.

2.2.1 INVERSORES RESONANTES (DC/AC) CON CONMUTACIÓN SUAVE

La ventaja más notable que tienen los convertidores resonantes de conmutación suave (soft-switching) sobre los de conmutación dura (hard-switching), es que en los hard-switching se ajusta el control de salida deseado de voltaje y/o corriente por medio de PWM. En este tipo de conmutación, el encendido y apagado de los dispositivos se da con la corriente de la carga, lo que hace que se presente pérdida de potencia por la conmutación [12]. Así a medida que aumenta la frecuencia, aumenta considerablemente la pérdida de potencia en el dispositivo [10].

En los inversores resonantes de conmutación suave, se superan las desventajas del control PWM, porque en este tipo de inversores, los dispositivos de conmutación se “encienden” y se “apagan” en el momento en que la corriente y/o el voltaje que pasan por el dispositivo son cero; de esta manera se consigue reducir las interferencias y las emisiones electromagnéticas [10, 12]. Se consigue un circuito resonante LC al obligar a la corriente y al voltaje a cruzar por cero, así se crea un convertidor de pulso resonante [10, 11, 12].

Los convertidores resonantes de potencia están conformados por diferentes componentes pasivos, capacitivos e inductivos, conocidos como elementos almacenadores de energía [12].

2.2.2 INVERSORES RESONANTES EN SERIE DE MEDIO PUENTE

En estos inversores se hace la conmutación por medio de dos elementos; si estos dos interruptores conmutan a la frecuencia de resonancia del tanque y el factor de calidad Q del circuito es alto, los interruptores funcionan cuando la corriente que circula por la carga, adquiere valores cercanos a cero, o es cero. Esta es una de las grandes ventajas que tienen estos tipos de inversores resonantes sobre los que no son resonantes, porque la potencia que absorben estos elementos de conmutación es mucho menor [10]. El circuito que se muestra en la figura 2.4 ilustra el diagrama de conexión de un inversor resonante con tanque LC en serie; esta es la topología que se utiliza en este trabajo.

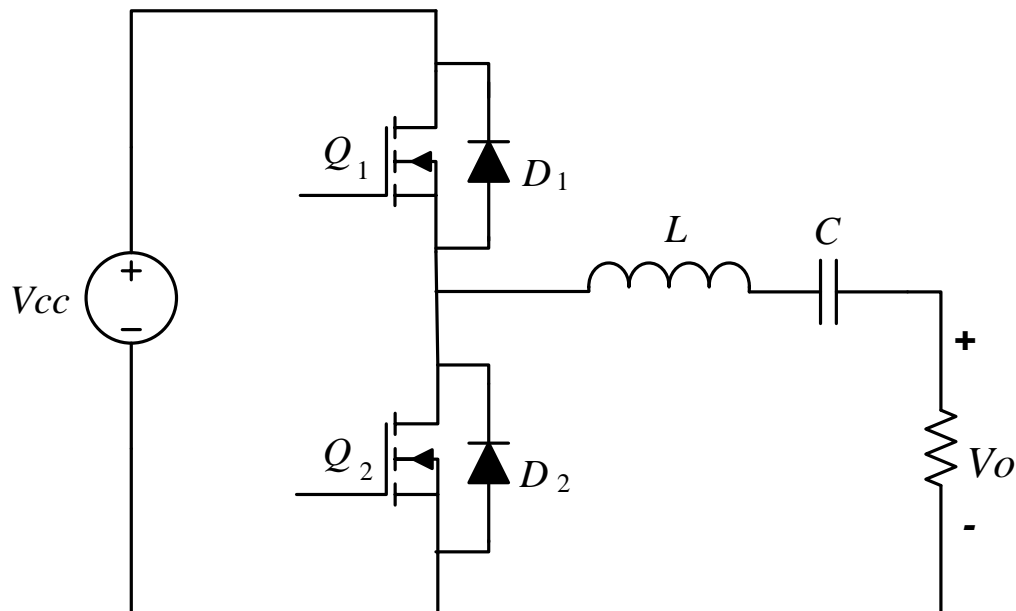


Figura 2.4. Inversor con tanque resonante serie LC.

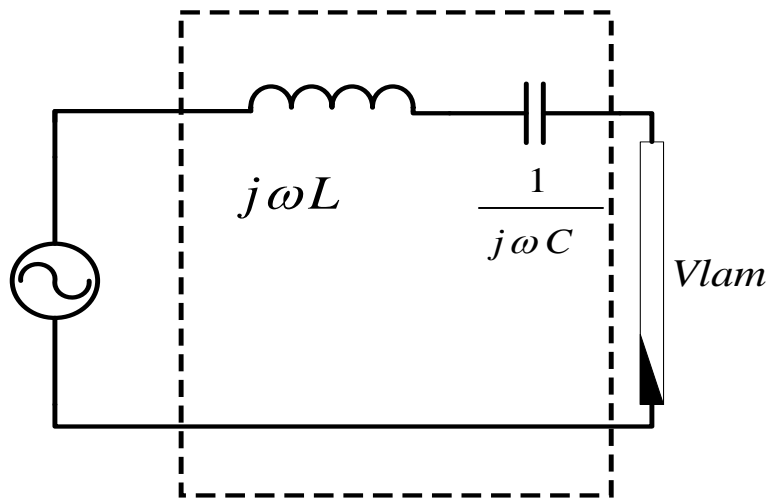


Figura 2.5. Circuito equivalente en términos de fasores de un circuito RLC, de un tanque resonante en serie.

En la figura 2.4 se ilustra el circuito básico de un inversor resonante en serie de medio puente. En la Figura 2.5 se muestra el circuito equivalente en fasores cuando se encuentra en modo conducción.

A continuación se presenta una introducción del análisis matemático, teniendo en cuenta la respuesta en frecuencia del circuito RLC que se aprecia en la Figura 2.4. El periodo de conmutación se da por:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (1)$$

La frecuencia de resonancia en el tanque está dada por la siguiente fórmula:

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

También se halla así:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

2.2.3 INVERSOR RESONANTE SERIE PUENTE COMPLETO

La operación del SRC se basa en tres parámetros: el parámetro de carga Q , la frecuencia de conmutación normalizada $f_s N$, que es la relación entre la frecuencia de conmutación f_s y la frecuencia de resonancia f_0 , y la relación de ciclo útil D . Para la eliminación deseada de los armónicos en la carga, se elige un parámetro de carga Q alto [17]. La frecuencia de conmutación normalizada $f_s N$ determina los rangos de frecuencia en los que opera el SRC [10, 14].

En la figura 2.5 se muestra un convertidor en serie (SRC) en configuración puente completo (FB).

El filtro tiene una respuesta en frecuencia que se puede expresar como ancho de banda y a su vez se puede caracterizar en términos del factor de calidad Q , así:

$$Q_s = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (5)$$

La longitud de onda está dada por:

$$\gamma = \frac{\pi}{f_s N} \quad (6)$$

La frecuencia de conmutación normalizada se relaciona como:

$$f_s N = \frac{f_s}{f_0} \quad (7)$$

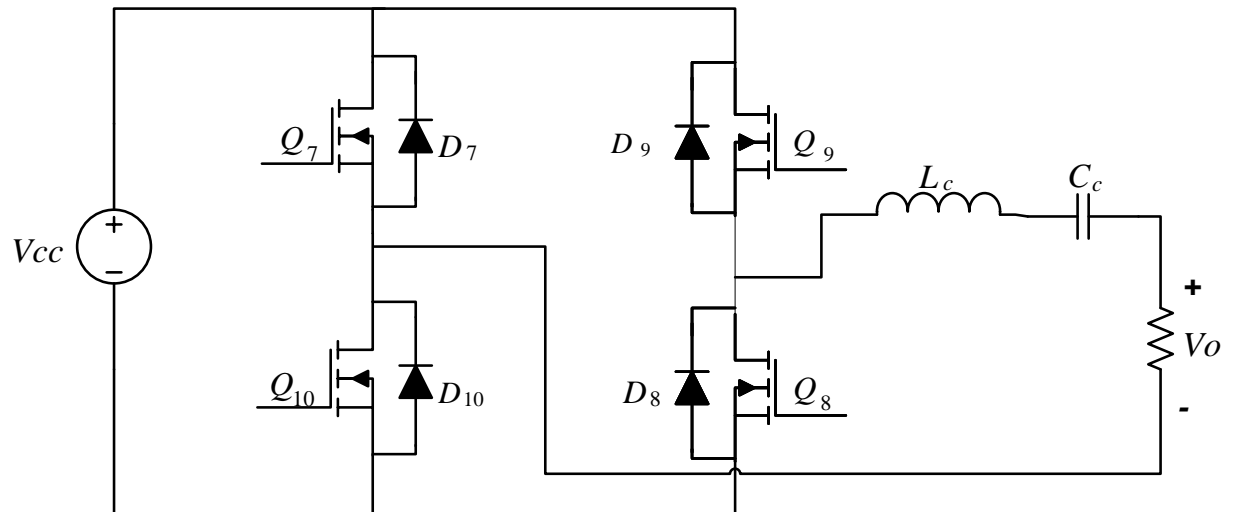


Figura 2.6. Circuito SRC en configuración FB (Punto Completo).

2.3 TANQUE RESONANTE

Los balastos electrónicos hacen uso de un tanque resonante, el cual se encarga de entregar el voltaje y corriente adecuados para el buen funcionamiento de la lámpara de descarga [17, 20, 23]; este debe operar a una frecuencia de resonancia o lo más cercano posible. Donde la impedancia que presenta el tanque resonante depende de la frecuencia en la cual se trabaja y de la configuración que se utilice. Existen dos formas generales de configurar el tanque resonante, son en serie y en paralelo.

En la figura (2.6) se presenta el diseño de un tanque resonante en serie compuesto por bobina, condensador y la carga que representa la lámpara fluorescente.

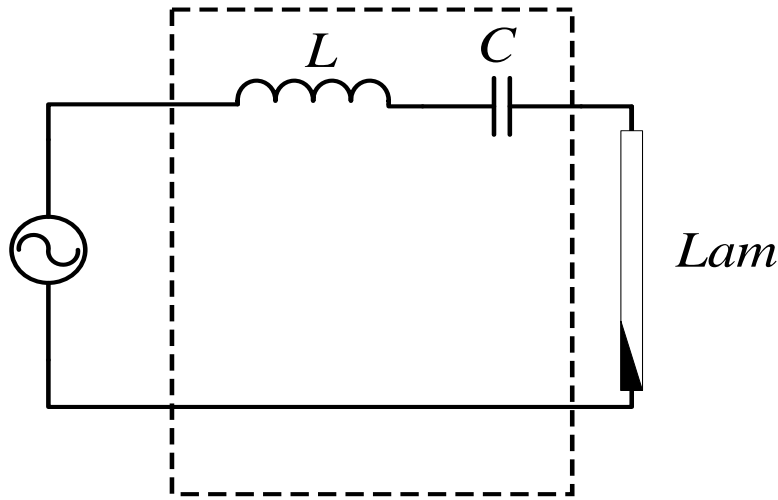


Figura 2.7. Tanque resonante LC en serie

En un tanque resonante en serie la inductancia es directamente proporcional a la frecuencia y la capacitancia es inversamente proporcional a esta, entonces si se aumenta la frecuencia, el valor de la inductancia aumenta y el valor de la capacitancia disminuye. Pero también se puede conseguir, en ciertas frecuencias, que los valores de las reactancias X_c y X_l sean iguales y de esta manera se anulan debido a que son complementarias [18]. Así la impedancia vista por la fuente es el valor de la resistencia [12]. La frecuencia de resonancia para un tanque en serie, se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Para un circuito R-L-C, el Factor de calidad en un tanque en serie está dado por la ecuación:

$$Q = \frac{\omega_s L}{R} \quad (9)$$

2.3.1 REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR UN TANQUE RESONANTE

Según el comportamiento de la lámpara, el tanque resonante debe tener ciertas características que permitan un buen funcionamiento, en el momento de arranque (ionización) y durante el estado estacionario de la lámpara [19, 21]. Los criterios que se deben analizar, según lo impone las lámparas fluorescentes son:

- Entregar una señal alterna y simétrica.
- Suministrar el voltaje adecuado de encendido.
- Limitar la corriente de descarga.

2.3.1.1 ENTREGAR UNA SEÑAL ALTERNA Y SIMETRICA

El inconveniente que se presenta cuando se aplica una señal asimétrica a la lámpara aparece cuando los inversores que se utilizan trabajan con señales unipolares aplicadas al tanque resonante [18, 21]. Por tal motivo el tanque necesita contar con un factor de calidad bastante alto, lo que obliga que los elementos involucrados sean de valor elevado y aumente el consumo de energía. Esto representa un resultado con baja eficiencia y un volumen excesivo [20, 21]. Lo que se recomienda para contrarrestar esta limitante es colocar un capacitor en serie con la lámpara para que este “absorba” la componente DC que contiene la señal unipolar y poderla convertir en una señal bipolar; para lo cual se debe contar con un factor de calidad considerablemente alto y aplicar una señal sinusoidal a la lámpara para controlar el voltaje pico de encendido [18, 19, 20, 21].

En la gráfica 2.5 se ilustra la forma de onda deseada en la salida del tanque resonante, la onda cuadrada representa la señal que entrega la etapa de conmutación, mientras que la onda alterna sinusoidal es la que se espera obtener sobre el elemento resistivo o la carga (para este caso es la lámpara).

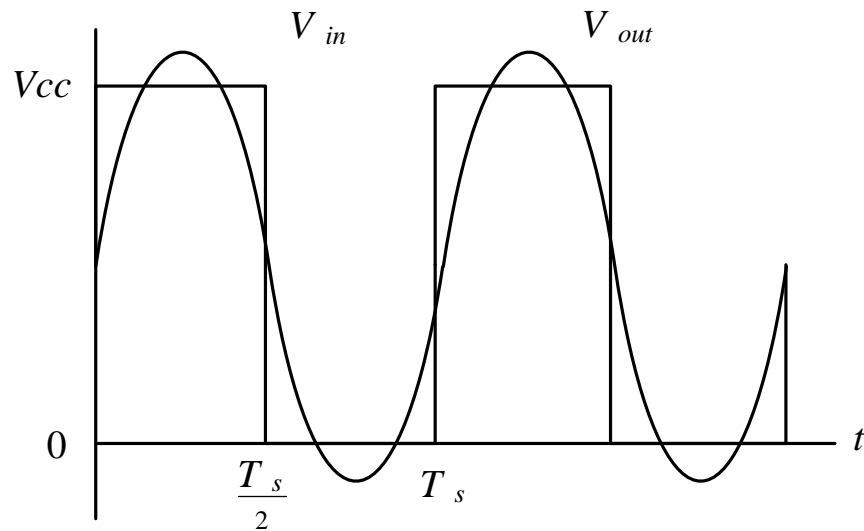


Figura 2.8. Relación de señal de entrada (cuadrada) y señal de salida (sinusoidal)

2.3.1.2 SUMINISTRAR EL VOLTAJE ADECUADO DE ENCENDIDO

Para el encendido de la lámpara se debe entregar un voltaje alto de arranque, que depende de las características y longitud del tubo de las lámparas de encendido instantáneo, esta tensión toma valores entre (300V a 900V) [10, 14, 18].

Por lo general se requiere elevar el voltaje de alimentación y esto se puede conseguir a través del tanque resonante serie, conectando un elemento del tanque en paralelo con la lámpara de descarga. Si el tanque resonante serie opera dentro de la frecuencia de resonancia, la magnitud del voltaje en los elementos involucrados es igual pero con un desfase de 180° , por consiguiente el voltaje promedio en el tanque resonante es cero, sin embargo el voltaje en sus elementos toma valores diferentes, y si se aplica un factor de calidad y una corriente lo suficientemente grandes en el tanque resonante, se logra que el voltaje en dichos elementos también sea elevado [10, 18, 19].

2.3.1.3 LIMITAR LA CORRIENTE DE CARGA

Debido a una de las características de las lámparas fluorescentes que se le llama el “fenómeno de resistencia negativa”, la cual consiste en que una vez ionizada la lámpara, aumenta la corriente en el arco lo cual obliga que disminuya el voltaje; por lo tanto se requiere contar con una solución para de limitación este comportamiento, de tal forma que se logre evitar que la corriente aumente discriminadamente hasta el punto de daño en el dispositivo y hasta en los componentes de la fuente de alimentación y el balasto [10, 19, 20, 21].

Los circuitos que se utilizan para este tipo de aplicaciones se llaman “lastres”, los cuales son dispositivos que cumplen la función de suministrar una resistencia positiva o reactancia para limitar la corriente eléctrica [17, 20, 21]. Existen varios diseños, que pueden variar desde una resistencia, un inductor o un capacitor en serie con el tubo de descarga [14, 16]. La utilización de un componente resistivo resulta poco eficiente debido al consumo y disipación de potencia; por otro lado un capacitor tiende a actuar como una fuente de voltaje y no presenta buena estabilización en la descarga de la lámpara; entonces lo que resta y es lo que mejor se recomienda es utilizar un inductor o un tanque resonante, con efecto inductivo, en serie con la lámpara fluorescente [14, 16, 20]. Esta es la configuración que se utiliza en este proyecto.

Capítulo 3

DISEÑO Y ANALISIS DEL INVERSOR RESONANTE

Debido a que los componentes a usar dependen de la impedancia de la carga, para realizar los cálculos correspondientes de inductancia y capacitancia a utilizar en el tanque resonante serie del inversor, es preciso realizar un análisis de la resistencia característica de la lámpara que se usa durante las pruebas.

3.1 RESISTENCIA DE LA LAMPARA

Una lámpara fluorescente, en su estado de ignición (ionización) se comporta como una resistencia muy elevada (circuito abierto) [22]. Mientras que durante el estado estable de operación, se comporta como una resistencia [13]. Para calcular el valor resistivo de esta, se utilizan los parámetros normales de trabajo de la lámpara (voltaje de operación y potencia de operación) donde se considera como una resistencia pura [13].

$$R_{Lam} = \frac{V_{Lam}^2}{P_{Lam}} = R_{eq} \quad (10)$$

dónde,

V_{Lam} = Voltaje de operación de la lámpara.

R_{Lam} = Resistencia equivalente de la lámpara.

P_{Lam} = Potencia de la lámpara.

R_{eq} = Resistencia equivalente de la lámpara.

Para el caso del inversor presentado:

$$R_{eq} = \frac{130^2}{32} = 528 \Omega \quad (11)$$

El valor calculado de la resistencia de la lámpara se comprueba mediante la gráfica 3.1, donde se muestra la resistencia característica de las lámparas fluorescentes.

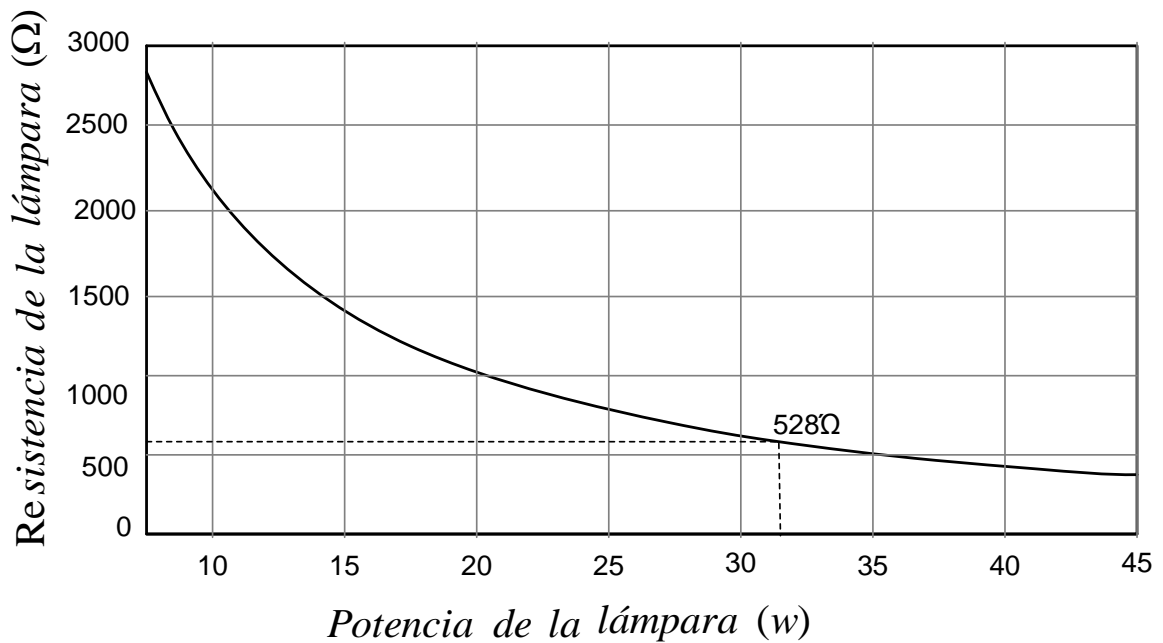


Figura 3.1. Resistencia característica de la lámpara en función de la potencia.

3.2 FACTOR Q:

El factor Q , comúnmente llamado “Factor de calidad”, hace referencia a la relación que existe entre la energía reactiva almacenada y la energía que disipa el tanque resonante en un ciclo completo de la onda sinusoidal [13]. Es el parámetro que

determina la calidad que posee la señal sinusoidal que el tanque aplica a la lámpara, donde se mide la agudeza de su resonancia [21]. A medida que el Q es mayor, mayor es la calidad de la señal que se entrega [9, 10, 11].

Teniendo en cuenta que el circuito a utilizar es un circuito R-L-C, la ecuación para hallar el factor de calidad Q , está dada por:

$$Q = \frac{\omega_s L}{R} \quad (12)$$

Entonces, el factor de calidad en el tanque resonante propuesto, es:

$$Q = \frac{2\pi(50000)(0.005)}{528} = 3 \quad (13)$$

3.3 DISEÑO DEL INVERSOR

Como se ha visto en el capítulo 2, los inversores se encargan de realizar una transferencia de potencia a partir de una fuente de voltaje DC, a una carga de voltaje AC [10].

Las condiciones del diseño se basan en un inversor con tanque resonante serie en configuración LC. La frecuencia de conmutación es de 50 KHz, a partir de una fuente de voltaje DC de 450 voltios con corrector de factor de potencia (la fuente no hace parte de esta propuesta), para alimentar una lámpara fluorescente de 32W. En la figura 3.1 se ilustra el tanque resonante serie conectado a la lámpara.

Inicialmente, se diseña la etapa de conmutación, para lo cual se eligen mosfet IRF840; luego se realiza el diseño del tanque resonante LC en serie, el cual a su vez estabiliza la corriente de la lámpara [1, 3].

Los diseños que se realizan, se comprueban por medio de simulación, antes de implementarlos, con el objetivo de determinar que los cálculos sean los deseados para el montaje final del inversor resonante.

3.3.1 ETAPA DE CONMUTACION

Esta etapa está compuesta por dos Mosfet IRF840, los cuales conmutan de manera alternada para entregar una señal cuadrada al tanque resonante [10, 12]. El diagrama del circuito utilizado se muestra en la gráfica 3.2, donde V_y es la señal resultante de la etapa de conmutación que alimenta al tanque resonante.

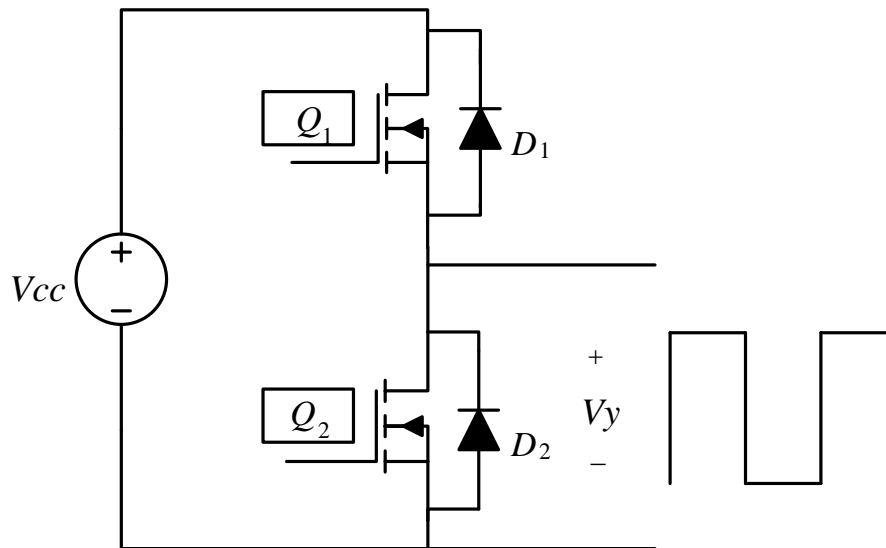


Figura 3.2. Etapa de conmutación.

3.3.2 ETAPA DEL TANQUE RESONANTE

El circuito tanque hace parte del resonante, está formado por una configuración adecuada entre una inductancia y una capacitancia, es un circuito que puede resonar a diferentes frecuencias, dependiendo de la señal de conmutación que se entrega en los switches de conmutación [10, 12, 19, 20] (para este caso se utilizan mosfet IR840).

Para alcanzar una alta eficiencia energética del inversor, específicamente, en el tanque resonante, se hace necesario lograr la mayor transferencia de energía con la menor pérdida posible; lo cual se logra en el punto de resonancia [1,10, 20]. Sin embargo, en este punto la lámpara tiene un comportamiento de resistencia negativa [5, 7]. “El incremento del número de electrones libres al momento de la descarga podría producir un alto riesgo para la integridad de la lámpara. La ionización continua de nuevos átomos de gas, provoca un crecimiento en la corriente de descarga, por consiguiente, si no se cuenta con un método para limitar dicha corriente, se puede llegar al punto de destrucción de la lámpara”; lo que se consigue con un buen diseño del tanque resonante [4, 7, 20].

El funcionamiento del inversor resonante, que se presenta en este trabajo, consiste en suministrar voltaje desde la etapa de conmutación de los mosfet, los cuales funcionan entregando pulsos de onda cuadrada a este tanque, de manera que el voltaje se aplique con una polaridad y luego conmute con su polaridad contraria.

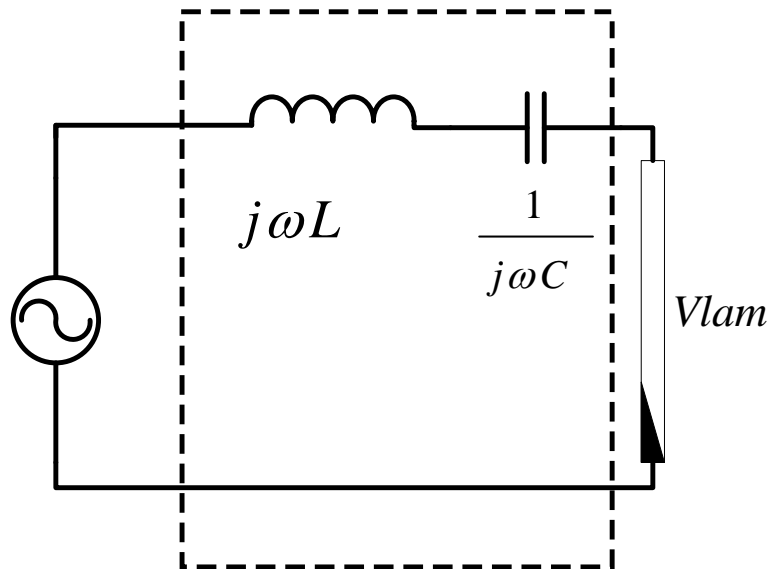


Figura 3.3. Circuito tanque en función de fasores.

Para completar el diseño del inversor, se calcula la inductancia y la capacitancia, usadas en el tanque resonante; de la siguiente manera:

3.3.2.1 ECUACION PARA EL CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA

Teniendo el valor del factor de calidad Q , se puede hallar el valor de la bobina, utilizando la siguiente fórmula:

$$L = \frac{QR}{\omega_0} \quad (14)$$

Reemplazando valores y tomando como referencia la frecuencia de operación del tanque resonante, la cual se ha propuesto de 50 KHz, queda:

$$L = \frac{(3)(528)}{2\pi f} \quad (15)$$

Reemplazando la frecuencia de resonancia en la fórmula (15), el valor de la bobina es:

$$L = \frac{(3)(528)}{2\pi(50000)} = 5 \text{ mH} \quad (16)$$

3.3.2.2 ECUACION PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA

La capacitancia del tanque, se halla a través de la fórmula:

$$C = \frac{1}{Q\omega_0 R} \quad (17)$$

Reemplazando valores en la fórmula (17), es:

$$C = \frac{1}{(3)(2\pi f)(528)} \quad (18)$$

Se reemplaza la frecuencia de resonancia en la fórmula (18) y el valor del condensador es:

$$C = \frac{1}{(3)(2\pi(50000))(528)} = 2nF \quad (19)$$

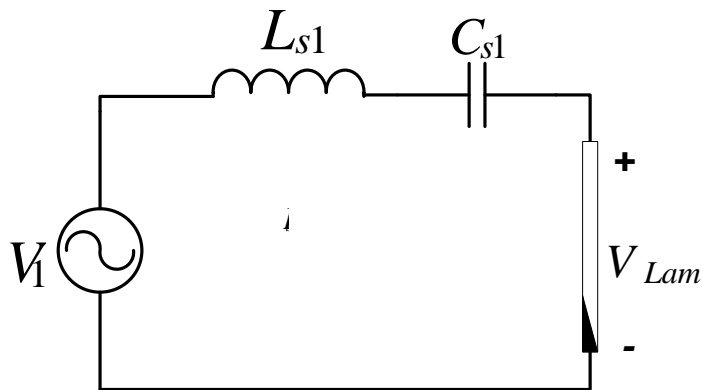


Figura 3.4 Circuito del tanque resonante LC serie.

3.3.3 FUNCIONAMIENTO

Los dos transistores mosfet (Q1 y Q2), se modulan mediante frecuencia para hacer que conmuten de manera alternada, entregando al tanque resonante una señal cuadrada, como se muestra en las figuras 3.6 y 3.6. En la figura 3.5 se muestra señalado con color rojo la parte del circuito que permanece activo en el

instante que está activo el mosfet 1 (Q_1); mientras que en la gráfica 3.6 se puede apreciar el circuito activo marcado con rojo cuando el mosfet 2 (Q_2), conduce.

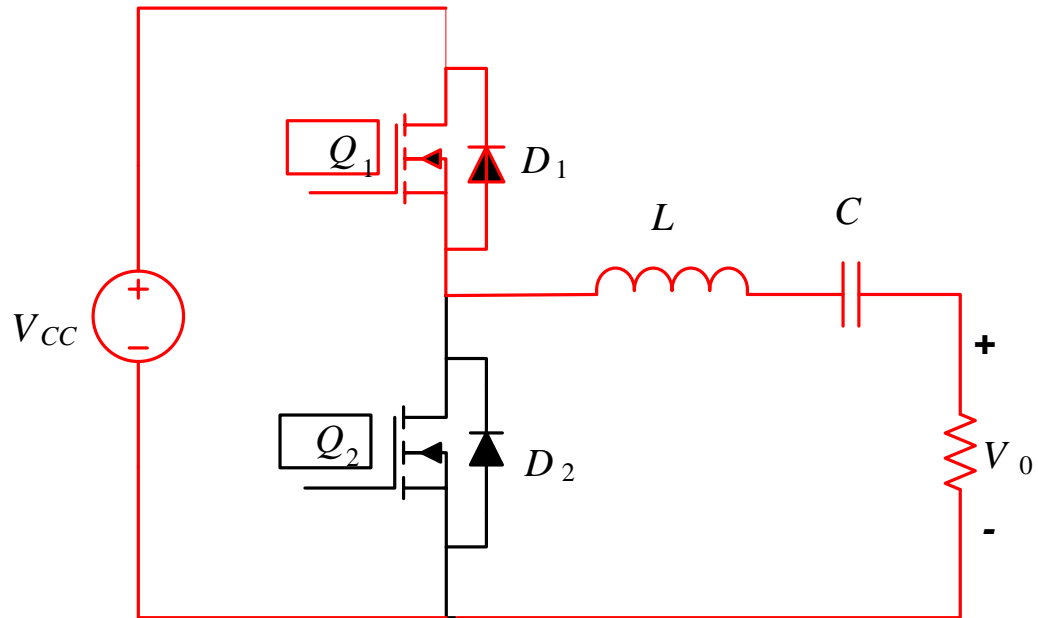


Figura 3.5. Inversor con tanque resonante LC en serie cuando Q_1 está activo.

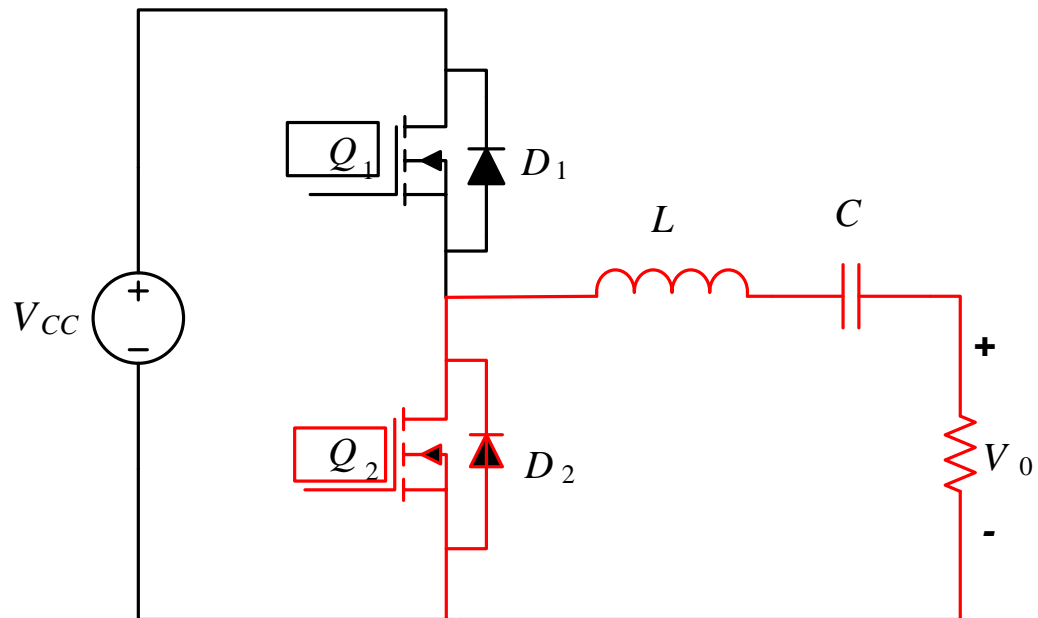


Figura 3.6. Inversor con tanque resonante LC en serie cuando Q_2 está activo.

Debido a las características típicas de las lámparas fluorescentes, se requiere suministrar un voltaje de precalentamiento [1, 2, 4].

En el desarrollo de este proyecto se implementó el uso de un circuito de arranque independiente del usado para el funcionamiento en estado estable de la lámpara, a partir del mismo convertidor DC/DC que se usa para el funcionamiento en estado estable de la lámpara; este convertidor DC/DC trabaja en modo de conducción continua, que a su vez corrige el factor de potencia [18].

3.4 CIRCUITO DE ARRANQUE DE LA LAMPARA FLUORESCENTE

Para que el gas de la lámpara pueda ionizarse, se requiere de un voltaje mayor que el voltaje en estado estable [5, 6, 8], para este propósito se diseña un circuito de arranque compuesto por 4 mosfet, conectados en configuración de puente H, tal como se muestra en la figura 3.7.

El diseño del circuito utilizado para el arranque (ionización) de la lámpara, se obtiene utilizando un puente H, que realiza la conmutación para generar una señal sinusoidal de alto voltaje, por medio del condensador y el transformador con aislamiento galvánico.

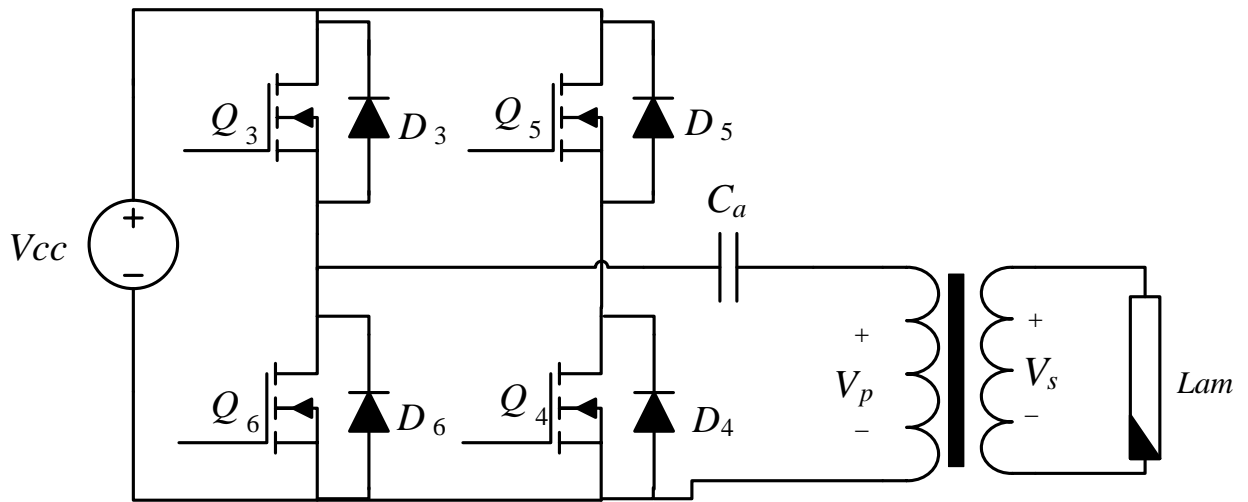


Figura 3.7. Circuito de ignición de la lámpara, en configuración puente H.

El esquema que se utiliza para la ignición de la lámpara, tal como se observa en la figura 3.7, es un sistema de conmutación en puente de onda completa; el cual genera en la salida un voltaje en forma de onda cuadrada [10]. Este voltaje se conecta a un transformador con aislamiento galvánico, el cual se encarga de elevar el voltaje a más de $720 R_{Lam}$, suficiente para encender la lámpara.

El Condensador C_a se instala con el fin de filtrar la componente DC que pudiera llegar al primario del transformador.

Cuando el mosfet 1 y el mosfet 2 se encuentran cerrados, la carga se conecta al voltaje positivo de la fuente; de la misma manera, la carga se conecta al voltaje negativo cuando los mosfet 3 y 4 están cerrados [10, 20].

3.5 INVERSOR CON TANQUE LCC

El inversor resonante con tanque LCC es una de las configuraciones más utilizadas en los balastos electrónicos para alimentar lámparas fluorescentes [20, 26, 27].

En la figura 4.2 se muestra el circuito del inversor en configuración L-C-C; donde se puede evidenciar que la diferencia con el inversor propuesto, es el condensador conectado en paralelo con la lámpara, este cumple la función de dar un voltaje alto en el momento de arrancar el circuito, con el propósito de ionizar la lámpara [23, 24, 25].

En la práctica se ha podido deducir que este condensador instalado en paralelo al tubo, genera consumo de energía en momentos innecesarios, por ejemplo mientras el circuito está en estado permanente. Cumpliendo con el único objetivo de servir como elemento de arranque, pero después continua consumiendo potencia, lo cual sirve para extraer la idea que el circuito propuesto sea más eficiente.

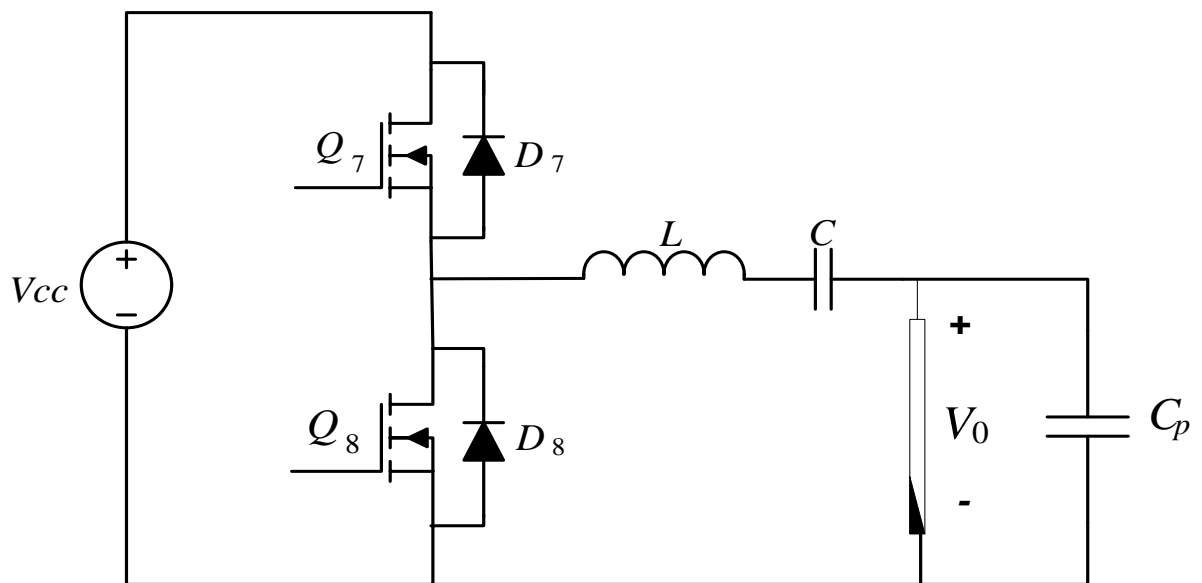


Figura 3.8. Inversor resonante con tanque LCC.

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE SIMULACION

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo se comparan con un inversor LCC (el cual es explicado en el capítulo anterior), también utilizados para alimentar lámparas fluorescentes.

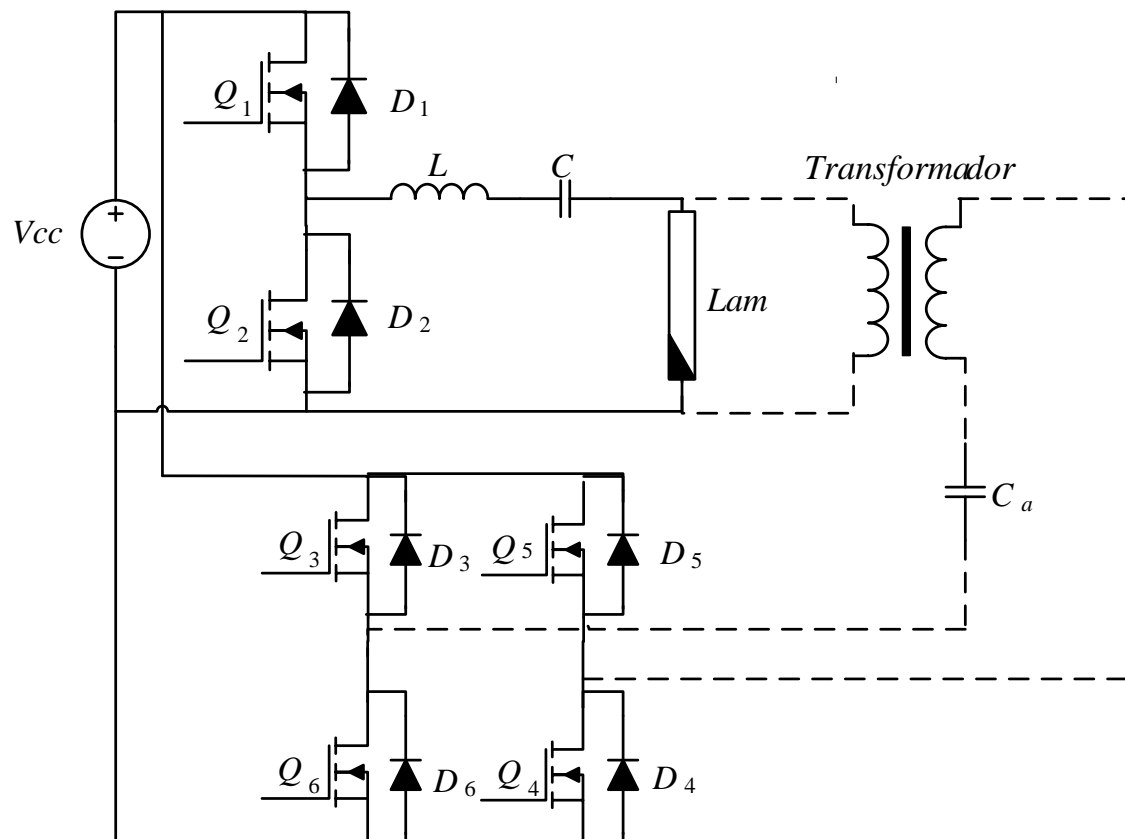


Figura 4.1. Circuito completo del inversor resonante con el tanque en serie y la etapa de ignición.

En la figura 4.1 se observa el diagrama del circuito final, con la etapa de conmutación, tanque resonante y la etapa de ignición. Este es implementado como prototipo para alimentar la lámpara fluorescente de 32 vatios; sobre este circuito se toman las medidas, los datos y resultados en la práctica y de simulación.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

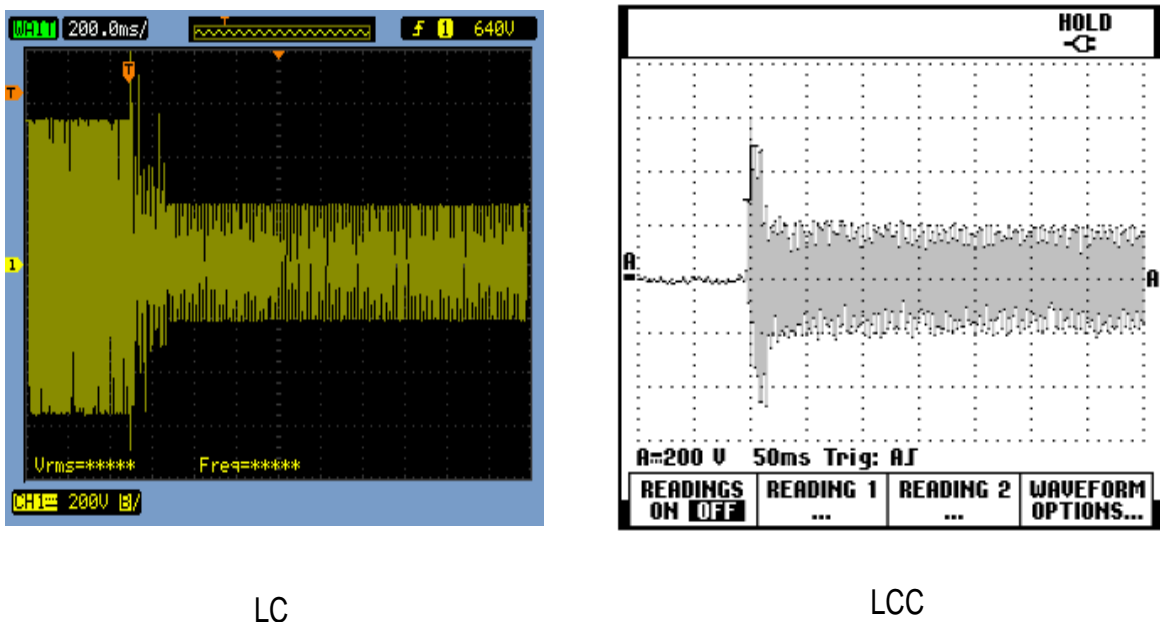
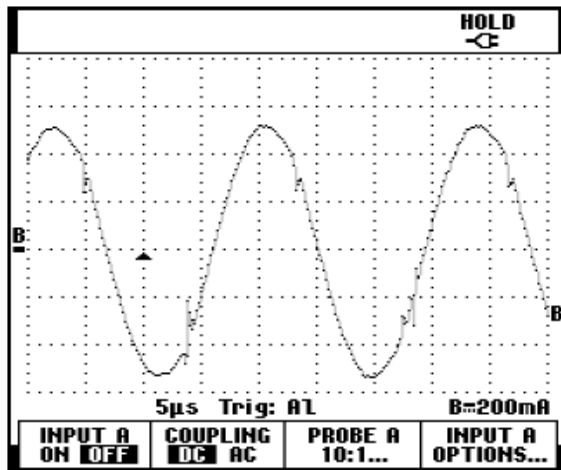
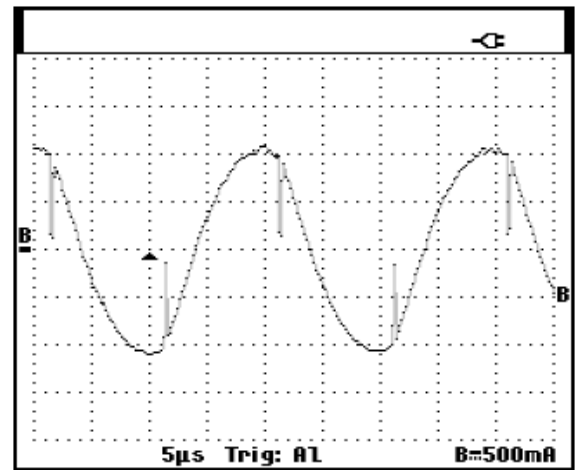


Figura 4.2. Voltajes de encendido en los inversores LC y LCC.

En la figura 4.2 se muestran los voltajes de encendido de la lámpara, tomados en el laboratorio sobre el inversor LCC y sobre el inversor propuesto en este trabajo, en configuración LC en serie, donde se observa que el voltaje entregado por el tanque LC es de 640 Voltios y presenta mayor estabilidad que el Voltaje entregado por el tanque con el condensador en paralelo al tubo fluorescente (LCC).



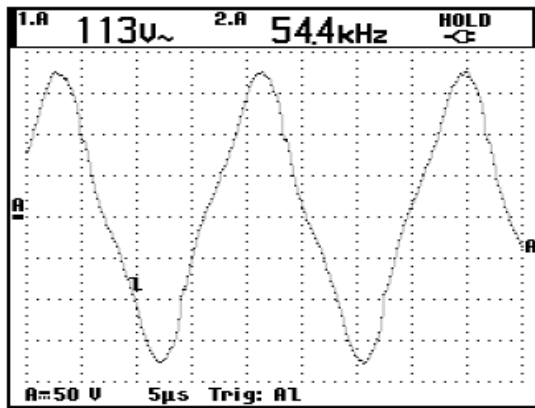
Corriente de la lámpara LC a 32W



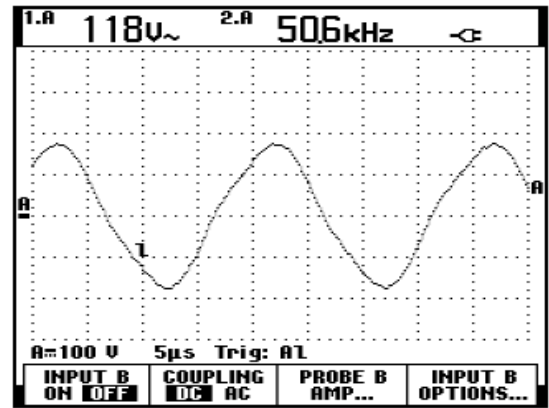
Corriente de la lámpara LCC a 32w

Figura 4.3. Corriente en los tanques LC y LCC.

En la figura 4.3 se muestran las corrientes tomadas sobre los inversores a comparar, donde se puede apreciar que para una carga de igual potencia, en este caso una lámpara de 32 vatios; la corriente que se mide en el inversor LCC es de aproximadamente 2 Amperios, mientras que la corriente que fluye por la lámpara usando el inversor con tanque resonante LC serie, es de aproximadamente 1.2 Amperios. Adicionalmente en la medida tomada sobre el tanque LCC se observan picos, los cuales representan pérdidas de potencia, debido al condensador instalado en paralelo a la lámpara. Con el resultado anterior se puede concluir que el circuito en configuración LC, ofrece mayor eficiencia que el tanque LCC.



Voltaje de la lámpara LC a 32W



Voltaje de la lámpara LCC a 32W

Figura 4.4. Voltajes en la lámpara de 32W.

Los voltajes tomados en el tubo fluorescente, con una fuente de alimentación de 450 voltios DC fijos y una frecuencia de conmutación de aproximadamente 50 KHz, se muestran en la gráfica 4.4. En esta gráfica se observa que en estado estable, el voltaje que debe suministrar el inversor con tanque LCC es de 118 voltios, mientras que con la configuración LC, el voltaje es menor (113V).

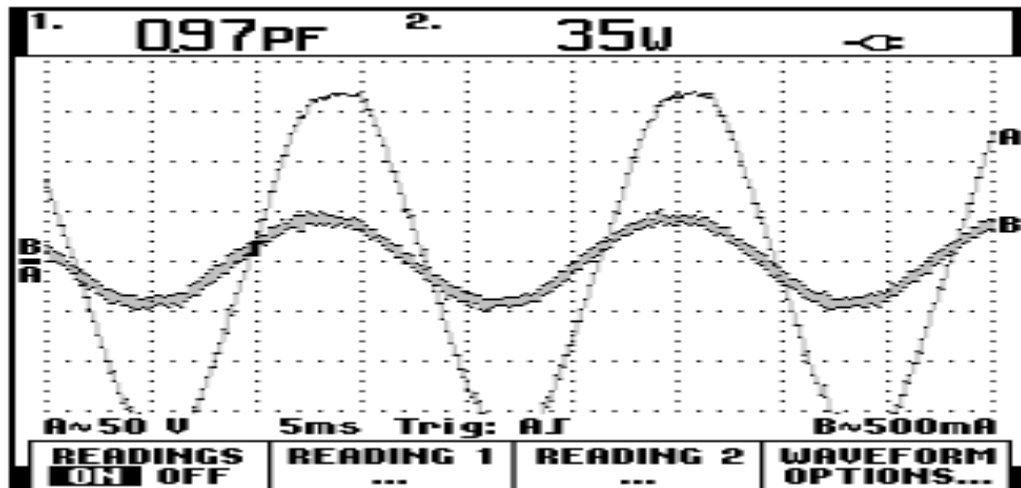


Figura 4.5. Corriente y voltaje en la lámpara.

En la gráfica 4.5 se muestra la forma en que la corriente sigue de manera adecuada al voltaje medido en la lámpara fluorescente.

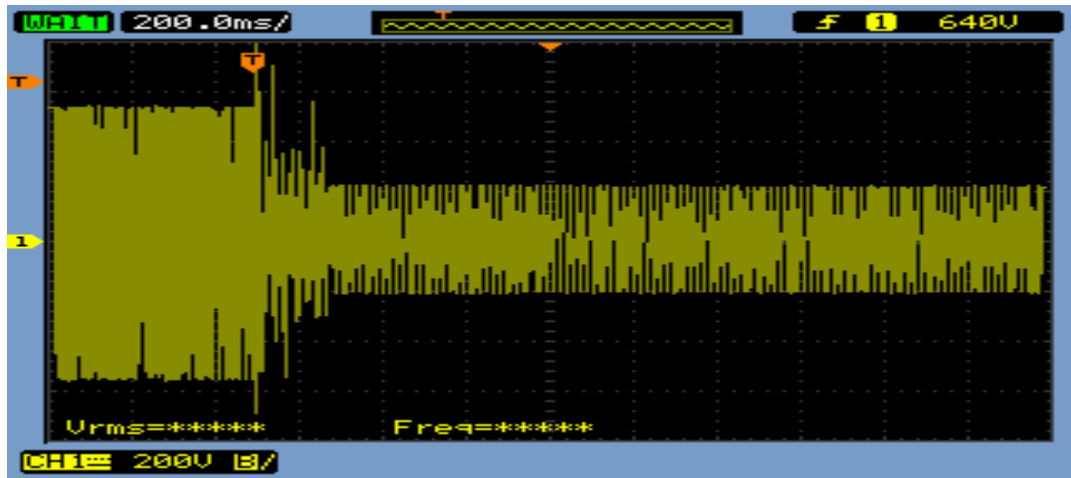
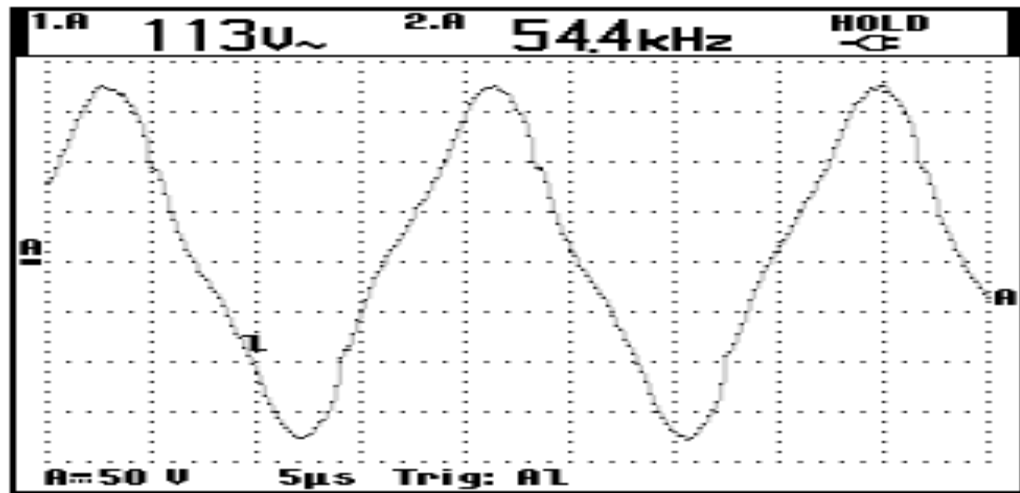


Figura 4.6. Voltaje de ignición y en estado estable LC.

En la figura 4.6 se puede observar las señales que representan los voltajes de encendido y en estado estacionario de la lámpara, donde se muestra que en el arranque de la lámpara, los picos de inicio son pronunciados y elevados, mostrando la gran demanda de energía al empezar, permitiendo la ionización del gas dentro de la lámpara y su respectivo calentamiento de los electrodos para el paso de los electrones; además se puede observar que después de un tiempo, se estabilizan los valores de voltaje y corriente en el circuito y en la lámpara.



Gráfica 4.7. Voltaje de la lámpara en estado estable.

En la figura 4.7 se puede observar la forma de onda a 54.4 KHz, que es la frecuencia entregada por el tanque resonante a la lámpara, según la medida en el osciloscopio, se comprueba, entonces, que los cálculos realizados para una frecuencia de 50 KHz son los adecuados. También se puede observar el voltaje pico medido en la lámpara, con un promedio de más de 400 voltios, el cual se mantiene estable y permite que la lámpara funcione adecuadamente y no se presente el molesto efecto estroboscópico.

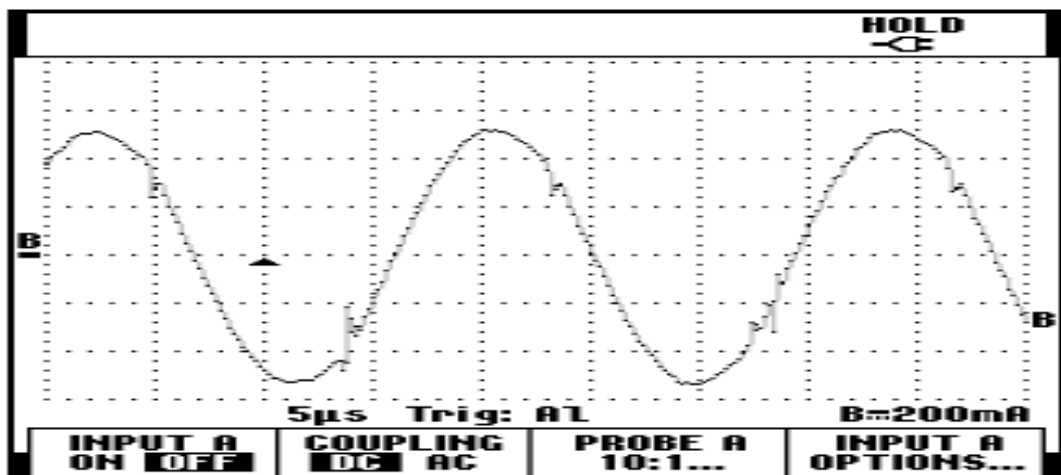


Figura 4.8. Corriente de la lámpara en estado estable.

En la figura 4.8 podemos observar la corriente circundante por la lámpara, en su estado de funcionamiento estable. Se evidencia una corriente de 1.2 Amperios, aproximadamente.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

- Los resultados y las gráficas obtenidas en el laboratorio son bastante aproximados a los esperados, según la simulación y los cálculos matemáticos realizados. Se logran resultados satisfactorios.
- Con la implementación de balastos electrónicos que operen a alta frecuencia, se elimina casi en su totalidad el efecto de parpadeo, obteniendo un alto desempeño de funcionamiento, reducción de peso, con respecto a los balastos electromagnéticos, cumpliendo de esta manera con la norma IEC-1000-3-2.
- Se logra trabajar a una frecuencia muy cercana a la frecuencia de resonancia propuesta, por lo cual se prueba que el diseño del tanque resonante genera una buena respuesta para obtener una señal a la salida con poca distorsión armónica.
- El inversor propuesto (Inversor resonante con tanque LC en serie), presenta mayor eficiencia en el uso de la energía que el inversor tradicional con tanque LCC.

- El circuito LC en serie, presenta una desventaja en cuanto a la necesidad de proporcionar un voltaje mayor para el encendido de la lámpara que en estado estable, debido a que se debe implementar un circuito adicional para cumplir con esta labor; la mejora se presenta como una propuesta en trabajos futuros.

TRABAJO FUTURO

- Implementar una etapa de dimerización con el objetivo de regular la potencia de la lámpara por medio de variación de la frecuencia.
- Modelar la lámpara por medio de un software de simulación.
- Reducir el tamaño del inversor.
- Automatizar el sistema de arranque de la lámpara.
- Controlar la potencia de salida regulando el voltaje de entrada.
- Desarrollo e implementación de topologías que puedan alimentar varias lámparas en paralelo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]** Edited by Timothy L. Skvarenina, “The power electronics handbook,” CRC press LLC, Printed in United States of America, II series, 2002.
- [2]** C. S. Moo, H. L. Cheng, T. F. Lin, and H. C. Yen, “Designing a dimmable Electronic ballast with voltage control for fluorescent lamp,” Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 786 – 791, 1999.
- [3]** R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Springer, 2ed ed., 200.
- [4]** E. Hammer, “High frequency characteristics of fluorescent lamps up to 500khz,” Journal of the Illuminating Engineering Society Winter, pp. 52–61, 1987.
- [5]** H. Chiu, L. Lin, and C. Wang, “Single-stage dimmable electronic ballast with high power factor and low emi,” IEEE Proceedings of Power Electronics, vol. 152, pp. 89–95, 2005.
- [6]** T. Ribarich and J. Ribarich, “A new control method for dimmable high-frequency electronic ballast,” International Rectifier Power IC Group, vol. 35, pp. 2038–2043, 1998.
- [7]** H.-L. Cheng and Y.-H. Huang, “Design and implementation of dimmable Electronic ballast for fluorescent lamps based on power-dependent lamp model,” IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 38, pp. 1644–1650, 2010.

[8] F. Schwarz, "A method of resonant current pulse modulation for power converters," IEEE Transactions on Industry Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-17, no. 3, pp. 209–221, 1970.

[9] F. Wakabayashi, R. Nunes, and C. Canesin, "High power factor dimmable electronic ballast for multiple tubular fluorescent lamps," IEEE Proceedings of Power Electronics, vol. 34, pp. 1063–1068, 2004.

[10] Daniel W Hart, Electrónica de Potencia, Pearson Educación S.A. Madrid 2001.

[11] V. Vorperian, Analysis of Resonant Converters. PhD thesis, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY., 1984.

[12] Muhammad H. Rashid, Electrónica de Potencia, "Circuitos, dispositivos y aplicaciones", Segunda edición, México, 1995.

[13] Héctor Manuel Guisar R. / Iván Illich Ibarra M. / José Isabel Martínez S. "Diseño de una balastra electrónica para una lámpara de VSAP de 150W.", Tesis Profesional para obtener el título de Ingeniero Eléctrico, Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Abril 2004.

[14] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook, Canada, 2001, Capítulos 13, 14 y 15.

[15] Ana María Blanco Castañeda, Tesis maestría, Efecto sobre los circuitos de distribución secundarios debido al uso intensivo de bombillas fluorescentes compactas y leds (light emitting diodes).

[16] J. Lam and P. K. Jain, "A new dimmable high power factor electronic ballast

system for compact fluorescent lamps (cfl) with standard incandescent phase-cut dimmers,” IEEE Transactions on Industrial Electronics and Instrumentation, vol. 16, pp. 472–478, 2009

[17] John Lam, “A dimmable high power factor electronic ballast for compact fluorescent lamps”, Queen’s University Kingston, Ontario, Canada (April, 2010).

[18] Raúl Antonio Ortiz, “Desarrollo de un balastro electrónico con alto factor de potencia, utilizando técnicas de conversión CD/CD para lámparas fluorescentes”, Cuernavaca, Morelos, Febrero de 1995.

[19] Carlos Manuel Morcillo Herrera, “Balastro electrónico integrado con control de intensidad luminosa y corrección de factor de potencia con control difuso”, Centro Nacional de investigación y desarrollo Tecnológico (Cenidet), Cuernavaca, Morelos, Septiembre del 2000.

[20] Fengfeng Tao, Fred C. Lee, Chairman, “Advanced High-Frequency Electronic Ballasting Techniques for Gas Discharge Lamps “, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, December 19, 2001.

[21] Noé Márquez Avendaño, “Diseño y construcción de un balastro electrónico alimentado con DC para encender una lámpara fluorescente de 21 W”, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, Marzo de 2005.

[22] Tadesse, D; Dawson, F.P, Dewan, S.B, Industry Applications Society Annual Meeting, 1993, Conference Record of the 1993 IEEE

2-8 Oct. 1993 Page(s):2341 - 2347 vol.3

[23] José Marcos Alonso Álvarez “Inversores resonantes de alta frecuencia” para optar a la plaza de profesor titular de la Universidad de Oviedo, Mayo de 1999.

[24] J. M. Alonso, A.J. Calleja, E. Lopez, J. Ribas, M. Rico; “Analysis and Experimental Results of a Single-stage High-power-factor Electronic Ballast Based on Flyback Converter” ,IEEE APEC'98 proceedings, pp. 1142-1148 Anaheim, California, USA

[25] Ruiz Díaz A, “Balastros Electrónicos Integrados con Corrección Activa del Factor de Potencia”, CENIDET, Tesis de Maestría, Cuernavaca, Mor. México, December de 1999

[26] Minong Qian, Fred C. Lee, Chairman, “Advanced Single-Stage Power Factor Correction Techniques”, Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Blacksburg, Virginia, September 25, 1997.

[27] Efrén Flores García, “Estudio e implementación de un inversor no resonante como balastro electrónico para lámparas de descarga”, Tesis para obtener el grado de: maestro en ciencias en ingeniería electrónica, Cenidet, Cuernavaca, Morelos, Febrero 2004.

[28] <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=32715>