

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

Tesis

“Diseño y Construcción de un Balastro Electrónico alimentado con CD para encender una Lámpara Fluorescente de 21 Watts”

**Para obtener el título de:
Ingeniero en Electrónica**

**Presenta
Noé Márquez Avendaño**

**Director de Tesis:
M.C. Esteban Osvaldo Guerrero Ramírez**

**Huajuapán de León, Oaxaca.
Marzo de 2005**

Tesis presentada el 17 de Marzo de 2005 ante los siguientes sinodales:

C. Dr. Felipe Santiago Espinosa
M.C. Fermín Hugo Ramírez Leyva
M.C. Alejandro Ruiz Figueroa

Bajo la dirección de:

M.C. Esteban O. Guerrero Ramírez

Dedicatoria

Dedico este trabajo a las personas más importantes en mi vida que han compartido conmigo momentos inolvidables y que hemos permanecido unidos a pesar de todas las adversidades.

Con todo mi cariño:

A MIS PADRES

Noé Rosendo Márquez y Esperanza Avendaño P.

A MIS HEMANAS

Carolina E. Márquez A, Gloria Elida Márquez A.

Noé

Agradecimientos

Le agradezco principalmente:

A Dios

Por darme la oportunidad de estar aquí para realizar este sueño. Por la felicidad y los beneficios que he recibido en mi vida te los debo sin duda alguna a ti Dios y te agradezco que siempre estés conmigo.

A mi padre: Noé Rosendo Márquez

Qué puedo decirte, sino mil gracias por ser el mejor ejemplo que he podido tener, eres el mejor padre que existe en el mundo. No puedo expresar todo lo que siento por ti, así que solamente digo GRACIAS, este trabajo es tuyo.

A mi madre: Esperanza Avendaño Porras

A ti te doy gracias por todos tus cuidados y porque siempre creíste en mí. Eres la mejor mujer que conozco. Te dedico este trabajo porque es algo que sin tu apoyo no hubiera podido ser.

A mis hermanas:

Carolina y Elida, primeramente por ser mis hermanas, por estar ahí para ayudarme y asesórame en diferentes cosas, por preocuparse por mi y por todas las alegrías que hemos pasado juntos las adoro.

A mi familia:

Se la dedico a todos mis tíos, primos, abuelitas. Pero en especial a mi abuelita Esperanza, a mi tío Roberto, a mis padrinos Elida y Abelardo, a Chaly, Alejo y Juan, que estuvieron apoyándome siempre con sus consejos.

A mi novia: Fabiola P. Cruz Pérez.

A ti faby, gracias por todo tu apoyo, confianza y consejos que me has brindado todo el tiempo y por ser el aliento que me impulsa a seguir adelante cada día TAM.

A mis queridos amigos de la infancia:

David O. Bernal Guerra (pollo), José Luis Guzmán Nolasco (Chepe), Maria Luisa Santos Cuellar (Michi), Carlos Aguirre Leyva (Charul), Cinthia Reyes Tiburcio (Cinthiux), Bertha A. Cervantes , Bere Techacha, nayelly vega, por ser los mejores amigos que he tenido desde muy pequeño, por estar conmigo incondicionalmente, por compartir sus experiencias conmigo, por el apoyo y el impulso que me han dado siempre, por compartir momentos inolvidables llenos de alegría y tristeza, pero que han hecho crecer y fortalecer nuestra amistad los quiero un montón.

A mi amiguísima Sara I. Martínez López:

Gracias por tu amistad que es muy importante para mí, por tu apoyo incondicional que me has brindado y por todos los momentos de alegría que hemos pasado juntos TQM.

Agradezco a mis compañeros:

De la carrera de ingeniería en electrónica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, porque la constante comunicación con ellos ha contribuido en gran medida a transformar y mejorar mi forma de actuar, pensar en mi trabajo, especialmente a Oscar, Iván, Carlos, Alfredo, Hever, Roció, Gabo, Chif, Tomas.

A mis profesores:

Agradezco a todos los profesores que de alguna manera contribuyeron en mi desarrollo en la carrera de electrónica, pero quiero darle un agradecimiento especial a mi director de tesis Esteban O. Guerrero Ramírez por su amistad, por compartir sus conocimientos y su valioso tiempo dedicado a este trabajo de tesis. También a Heriberto I. Hernández Martínez por su ayuda incondicional, consejos y motivación que me brindó en este trabajo de tesis. A Fermín Hugo Ramírez Leyva, Felipe Santiago Espinosa y Alejandro Ruiz Figueroa, por la gran contribución que brindaron en la revisión de este documento, por sus valiosas sugerencias para que éste fuera un buen trabajo, y por todo el apoyo y amistad que me brindaron durante toda mi carrera.

Finalmente a todas aquellas personas que me brindaron cariño, comprensión y apoyo, dándome con ello, momentos muy gratos. Mil gracias. Noé.

Índice general.....	ix
Lista de figuras.....	xiii
Lista de tablas.....	xvii
Simbología.....	xix
Introducción.....	xxi
1. Lámparas de descarga	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.2.1 Naturaleza de la luz.....	2
1.2.2 Clasificación de las fuentes luminosas	2
1.2.3 Clasificación de las fuentes luminosas de acuerdo a la transformación de energía	3
1.2.4 Propiedades cromáticas de las fuentes luminosas.....	4
1.2.4.1 Temperatura del color.....	4
1.2.4.2 Índice del rendimiento del color (IRC).....	5
1.2.5 Unidades luminosas	5
1.3 Clasificación de las lámparas eléctricas.....	5
1.3.1 Lámparas de incandescencia.....	6
1.3.1.1 Lámpara incandescente convencional	6
1.3.1.2 Lámpara incandescente halógena	7
1.3.1.3 Características de las lámparas de incandescencia	8
1.3.2 Lámparas de descarga gaseosa	8
1.3.2.1 Lámparas de vapor de mercurio.....	9
1.3.2.1.1 Lámparas de vapor de mercurio a baja presión	9
1.3.2.1.2 Lámparas de vapor de mercurio a alta presión	9
1.3.2.2 Lámparas de vapor de sodio	11
1.3.2.2.1 Lámparas de vapor de sodio de baja presión	11
1.3.2.2.2 Lámpara de vapor de sodio de alta presión.....	12
1.3.2.2.3 Características de las lámparas de descarga	13

1.4	Lámpara fluorescente.....	13
1.4.1	Partes de una lámpara fluorescente.....	14
1.4.2	Principio de funcionamiento.....	15
1.4.2.1	Estado de la descarga en los gases.....	15
1.4.2.2	Tiempo de máxima emisión luminosa de la lámpara fluorescente.....	16
1.4.3	Tipos de encendidos de las lámparas fluorescentes.....	17
1.4.4	Efecto de la frecuencia en las lámparas fluorescentes.....	18
1.4.4.1	Operación en baja frecuencia.....	18
1.4.4.2	Operación en alta frecuencia.....	19
2.	Balastos	21
2.1	Introducción.....	21
2.2	Balastos para lámparas de descarga.....	22
2.2.1	Clasificación de los balastos.....	22
2.2.1.1	Balastro electromagnético.....	22
2.2.1.1.1	Tipos de balastos electromagnéticos para lámparas fluorescentes.....	22
2.2.1.1.2	Partes de un balastro electromagnético.....	23
2.2.1.2	Balastro electrónico.....	24
2.2.1.3	Comparación entre los balastos.....	25
2.3	Inversor resonante.....	26
2.3.1	Topologías básicas de inversores.....	27
2.3.1.1	Inversor Push-Pull.....	28
2.3.1.2	Inversor Medio puente.....	29
2.3.1.3	Amplificador Clase D.....	30
2.3.1.4	Inversor puente completo.....	30
2.3.1.5	Amplificador clase E conmutado a voltaje cero.....	31
2.3.2	Selección de la topología inversora.....	32
2.3.3	Tanque Resonante.....	33
2.3.3.1	Características del tanque resonante.....	34
2.3.3.1.1	Combinaciones de los elementos del tanque resonante.....	34
2.3.3.1.2	Análisis de las distintas combinaciones.....	35
2.3.3.2	Selección del tanque resonante.....	35
2.3.3.2.1	Tanque resonante LC paralelo (LCP).....	36
2.3.3.2.2	Tanque resonante LCC paralelo (LCCP).....	37
2.3.3.2.3	Tanque resonante LCC serie (LCCS).....	38
3.	Análisis y Diseño del balastro electrónico	41
3.1	Introducción.....	41
3.2	Análisis del balastro electrónico.....	41
3.2.1	Especificaciones de la lámpara fluorescentes.....	42
3.2.2	Especificaciones del circuito oscilador-impulsor.....	43
3.2.2.1	Circuito oscilador.....	43
3.2.2.2	Circuito impulsor.....	45
3.2.3	Especificaciones del ACECVC y el tanque resonante.....	46
3.2.3.1	Selección del interruptor.....	47
3.2.3.2	Factor de calidad (Q) y relación de inductancias (H).....	49
3.3	Diseño del balastro electrónico.....	49
3.3.1	Señales generadas por el programa de diseño.....	51

3.4	Diseño de los inductores	52
3.4.1	Especificaciones de un núcleo de ferrita RM	53
3.4.2	Especificaciones de diseño	54
3.4.3	Procedimiento de diseño de inductores con núcleo de ferrita RM	54
3.4.3.1	Conductor de cobre	55
3.4.3.2	Número total de espiras en el núcleo RM	56
3.4.3.3	Número de vueltas en el inductor	56
4.	Simulaciones y Resultados experimentales.....	57
4.1	Introducción	57
4.2	Simulación del circuito	58
4.2.1	Estado de Pre-Encendido	58
4.2.2	Estado estable del balastro electrónico	60
4.2.2.1	Formas de onda en la fuente de alimentación	60
4.2.2.2	Formas de onda en el interruptor	60
4.2.2.3	Señales en la Lámpara fluorescente	62
4.2.2.4	Eficiencia	63
4.2.2.5	Corriente en el inductor Lo	63
4.3	Prototipo experimental del Balastro Electrónico	64
4.3.1	Instalación del sistema de iluminación	64
4.3.2	Resultados experimentales	65
4.3.2.1	Estado de Pre-encendido	65
4.3.2.2	Estado estable	66
4.3.2.2.1	Señales en la fuente de alimentación	66
4.3.2.2.2	Señales en el interruptor	66
4.3.2.2.3	Señales en la lámpara fluorescente	67
4.3.2.2.4	Potencia en la lámpara fluorescente	68
4.3.2.2.5	Otros parámetros	68
4.4	Comparación de simulaciones y resultados experimentales	69
4.4.1	Comparación con un balastro comercial	71
5.	Conclusiones.....	75
5.1	Trabajos futuros	76
6.	Bibliografía.....	77
6.1	Paginas de internet	79
Anexo A	Manual de usuario del programa de diseño para un balastro electrónico basado en el ACECVC y un tanque resonante LCC serie.....	A-1
A.1	Elementos de la ventana principal	A-1
A.1.1	Botones de diseño de cada etapa del balastro	A-2
A.1.2	Cálculo de la resistencia interna lámpara fluorescente	A-3
A.1.3	Diseño del circuito oscilador-impulsor	A-5
A.1.4	Diseño del ClaseE/LCCs	A-8
A.1.5	Diseño de los Inductores RM	A-11
A.1.6	Placa final	A-13

Anexo B	Elementos utilizados, fotografías, diagrama esquemático, placa impresa y lista de materiales del balastro electrónico.....	B-1
B.1	Lista de materiales y sistemas utilizados.....	B-1
B.2	Diagrama esquemático.....	B-4
B.3	Tabla de los calibres de cobre.....	B-5
B.4	Lista de componentes.....	B-6
B.5	Tabla de los calibres de cobre.....	B-7
Anexo C	Hojas de especificaciones de los dispositivos utilizados para el diseño del balastro electrónico.....	C-1
C.1	Hojas de especificaciones.....	C-2
C.1.1	Diodo de rectificación rápida.....	C-2
C.1.2	Mosfet de potencia IRFP450.....	C-3
C.1.3	Controlador de compuerta IR2110.....	C-5
C.1.4	Temporizador LMC555.....	C-8

Lista de figuras

Figura 1.1	Diagrama del espectro electromagnético	2
Figura 1.2	Clasificación de las lámparas Eléctricas	5
Figura 1.3	Funcionamiento de una lámpara incandescente.....	6
Figura 1.4	Partes de una lámpara incandescente.....	7
Figura 1.5	Lámpara incandescente halógena	8
Figura 1.6	Descarga eléctrica	8
Figura 1.7	Formas de lámparas fluorescentes	9
Figura 1.8	Lámpara de vapor de mercurio a alta presión.....	10
Figura 1.9	Lámpara de mezcla	11
Figura 1.10	Lámpara de halogenuros metálicos.....	11
Figura 1.11	Lámpara de vapor de sodio a baja presión.....	11
Figura 1.12	Lámpara de vapor de sodio a alta presión.....	12
Figura 1.13	Partes que constituyen una lámpara fluorescente	14
Figura 1.14	Funcionamiento lámpara fluorescente	15
Figura 1.15	Ruptura de descarga en los gases.....	16
Figura 1.16	Tiempo de encendido de la lámpara fluorescente.....	17
Figura 1.17	Lámpara de arranque rápido	18
Figura 1.18	Lámpara de arranque instantáneo	18
Figura 1.19	Forma de onda en baja frecuencia	19
Figura 1.20	Formas de onda a medida que aumenta la frecuencia	20
Figura 2.1	Balastro de una lámpara de descarga.....	21
Figura 2.2	Tipos de balastos para lámparas fluorescentes	23
Figura 2.3	Contenedor metálico del balastro	23
Figura 2.4	Construcción interna de un cebador.....	24
Figura 2.5	Partes de un balastro electrónico convencional	24
Figura 2.6	Diagrama a bloques de un Balastro Electrónico.....	25
Figura 2.7	Etapas de un inversor resonante.....	26
Figura 2.8	Comparativo de las pérdidas generadas por la conmutación dura y suave.....	27

Figura 2.9	Circuito esquemático de un inversor Push-Pull.....	28
Figura 2.10	Circuito esquemático de un inversor medio puente.....	29
Figura 2.11	Circuito esquemático de un amplificador Clase D.....	30
Figura 2.12	Circuito esquemático de un inversor puente completo.....	30
Figura 2.13	Circuito esquemático de un inversor clase E.....	31
Figura 2.14	Tanque Resonante LCR serie.....	33
Figura 2.15	Tanque resonante LCR paralelo.....	34
Figura 2.16	Combinaciones del tanque resonante entre la señal de entrada y la carga.....	34
Figura 2.17	Tanques resonantes para lámparas de arranque instantáneo.....	36
Figura 2.18	Tanque resonante LC paralelo.....	36
Figura 2.19	Circuito equivalente.....	37
Figura 2.20	Circuito equivalente durante el pre-encendido LCP.....	37
Figura 2.21	Tanque resonante LCCP.....	38
Figura 2.22	Circuito serie equivalente.....	38
Figura 2.23	Circuito equivalente durante el pre-encendido LCCP.....	38
Figura 2.24	Tanque resonante LCCS.....	39
Figura 2.25	Circuito serie equivalente.....	39
Figura 2.26	Circuito equivalente durante el preencendido LCCS.....	39
Figura 3.1	Diagrama a bloques del balastro electrónico.....	42
Figura 3.2	Lectura de los símbolos en la lámpara.....	42
Figura 3.3	Circuito oscilador temporizador LMC555.....	44
Figura 3.4	Circuito impulsor IR2110.....	45
Figura 3.5	Esquema del Balastro Electrónico.....	46
Figura 3.6	MOSFET y símbolo.....	47
Figura 3.7	Circuito del ACE con la capacitancia que forma C_1	48
Figura 3.8	Grafica de la capacitancia C_1 contra el voltaje de alimentación.....	48
Figura 3.9	Gráfica de la capacitancia C_{oss} contra el voltaje drenaje fuente.....	49
Figura 3.10	Señales del programa de diseño.....	51
Figura 3.11	Inductor con núcleo de aire.....	52
Figura 3.12	Tipos de núcleo de ferrita.....	53
Figura 3.13	Núcleo RM y su sección transversal.....	54
Figura 3.14	Frecuencias de los diferentes tipos de materiales de núcleos de ferrita.....	55
Figura 4.1	Circuito de preencendido.....	58
Figura 4.2	Señal de preencendido del balastro electrónico.....	58
Figura 4.3	Circuito de preencendido modificado.....	59
Figura 4.4	Voltaje de preencendido en la lámpara fluorescente.....	59
Figura 4.5	Circuito en estado estable.....	60
Figura 4.6	Voltaje, corriente y potencia en la fuente de alimentación.....	61
Figura 4.7	Esfuerzo de voltaje en el DSEP y señal de compuerta.....	61
Figura 4.8	Esfuerzo de corriente en el DSEP y señal de compuerta.....	61
Figura 4.9	Esfuerzos de voltaje y corriente en el DSEP.....	62
Figura 4.10	Señales de voltaje y corriente en la lámpara fluorescente.....	62
Figura 4.11	Potencia promedio en la lámpara fluorescente.....	62
Figura 4.12	Eficiencia.....	63
Figura 4.13	Corriente en el inductor L_o	63
Figura 4.14	Balastro electrónico.....	64
Figura 4.15	Instalación del sistema de iluminación.....	65

Figura 4.16	Voltaje de preencendido de la lámpara fluorescente	65
Figura 4.17	Voltaje de estado estable.....	66
Figura 4.18	Voltaje en el interruptor	66
Figura 4.19	Corriente en el interruptor.....	67
Figura 4.20	Señal de control y voltaje en el interruptor.....	67
Figura 4.21	Voltaje y corriente del interruptor	67
Figura 4.22	Voltaje y corriente experimentales en la lámpara.....	68
Figura 4.23	Potencia en la lámpara fluorescente.....	68
Figura 4.24	Corriente del inductor L_o	68
Figura 4.25	Comparación de resultados experimentales y simulaciones.....	69
Figura 4.26	Armónicos de la señal de voltaje y corriente de la lámpara	71
Figura 4.27	Voltaje en la lámpara fluorescente.....	71
Figura 4.28	Corriente en la lámpara fluorescente	71
Figura 4.29	Conexión de medición del balastro electromagnético	72
Figura 4.30	Potencia de entrada y salida del balastro electromagnético.....	72
Figura 4.31	Armónicos en la lámpara fluorescente.....	73
Figura A.1	Pantalla principal del programa de diseño.....	A-2
Figura A.2	Menú de botones de diseño.....	A-3
Figura A.3	Botón Lámpara fluorescente.....	A-3
Figura A.4	Ventana del cálculo de la resistencia interna de la lámpara fluorescente.....	A-4
Figura A.5	Bloques de cálculo de la lámpara.....	A-5
Figura A.6	Botón Lámpara fluorescente.....	A-5
Figura A.7	Diseño del circuito oscilador impulsor.....	A-6
Figura A.8	Panel cálculo del Bootstrap.....	A-7
Figura A.9	Panel de resistencia, capacitor y resultados.....	A-7
Figura A.10	Período total, tiempo en alto y bajo de la señal	A-7
Figura A.11	Botón Lámpara fluorescente.....	A-8
Figura A.12	Diseño del circuito oscilador impulsor.....	A-8
Figura A.13	Datos Amp. Clase E.....	A-9
Figura A.14	Panel principal balastro electrónico.....	A-10
Figura A.15	Tablas que genera el programa de diseño.....	A-11
Figura A.16	Botón diseño de inductores.....	A-11
Figura A.17	Diseño del circuito oscilador impulsor.....	A-12
Figura A.18	Diseño de tanque resonante.....	A-12
Figura A.19	Especificaciones del núcleo RM.....	A-13
Figura A.20	Botón Lámpara fluorescente.....	A-13
Figura A.21	Diseño final del balastro electrónico.....	A-14
Figura B.1	Elementos de medición del balastro electrónico.....	B-1
Figura B.2	Conexión del Balastro electrónico.....	B-2
Figura B.3	Capturación de datos computadora.....	B-2
Figura B.4	Comparación de la emisión de luz.....	B-3
Figura B.5	Fluke 43 power quality analyzer.....	B-3
Figura B.6	Diagrama esquemático del balastro electrónico.....	B-4
Figura B.7	Circuito impreso del balastro electrónico.....	B-5

Lista de tablas

Tabla 1.1	Clasificación de las fuentes luminosas	3
Tabla 1.2	Tipo de tonalidad de luz de las lámparas	4
Tabla 1.3	Comparación de los tipos de lámparas	8
Tabla 1.4	Características de las lámparas de descarga	13
Tabla 2.1	Comparación entre los Balastos electrónicos y electromagnéticos	25
Tabla 2.2	Comparativa de las topologías empleadas en balastos electrónicos	32
Tabla 3.1	Valores calculados para la oscilación del LMC555	44
Tabla 3.2	Parámetros para el cálculo del Bootstrap del IR2110	45
Tabla 3.3	Datos de entrada	50
Tabla 3.4	Parámetros de salida	50
Tabla 3.5	Otros parámetros	50
Tabla 3.6	Ventajas y desventajas del uso de núcleos de ferrita	53
Tabla 3.7	Tipo de núcleo a utilizar dependiendo de la potencia	55
Tabla 4.1	Datos modificados del balastro electrónico	59
Tabla 4.2	Comparación de los resultados simulados y experimentales	70
Tabla 4.3	Distorsión armónica total	70

Simbología

ACECVC	Amplificador Clase E Conmutado a Voltaje Cero
C	Capacitor C en Temporizador LMC555
C_1	Capacitor linealizado
C_2	Capacitor tanque resonante serie con la lámpara
C_3	Capacitor tanque resonante paralelo
CA	Corriente alterna
CCC	Conmutación a corriente cero
CD	Corriente directa
C_{EXT}	Capacitor externo
C_O	Capacitor resonante
C_{oss}	Capacitor parasito del DSP
C_S	Capacitor lineal
CVC	Conmutación a voltaje cero
D	Ciclo de trabajo
DSP	Dispositivo semiconductor de potencia
F	Frecuencia de conmutación
H	Relación de inductancia (L_O/L_C)
I_{lamp}	Corriente máxima en la lámpara
I_{Lc}	Corriente interruptor L_C
IRC	Índice del rendimiento del color
I_{sw}	Esfuerzo de corriente en el DSP
L_C	Inductor de choque
L_O	Inductor tanque resonante
m	Coefficiente de distribución
MOSFET	Transistor de Efecto de campo Metal-Oxido-Semiconductor
Pent	Potencia de entrada
Psal	Potencia de salida

Pspice	Programa de simulación de los circuitos
PWM	Modulación por ancho de pulso
Q	Factor de calidad
R_A	Resistencia R_A en timer LMC555
R_B	Resistencia R_B en timer LMC555
R_C	Resistencia de carga ACE basico
R_g	Resistencia de compuerta DSP
R_L	Resistencia interna Lámpara fluorescente
R_{on}	Resistencia de encendido del mosfet
R_p	Resistencia parasita
V_{bi}	Voltaje integral de la unión
V_{DC}	Voltaje de alimentación
V_{lamp}	Voltaje máximo en la lámpara
V_{sw}	Esfuerzo de voltaje en el DSP
η	Eficiencia (Psal/Pent)
λ	Longitud de onda

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se estima que el 17 % del consumo de energía eléctrica en el mundo corresponde al área de iluminación artificial [18] . En nuestro país, las reservas energéticas se han degradado considerablemente en los últimos años, razón por la cual ha aumentado la preocupación por el ahorro de energía.

Con la finalidad de cubrir las necesidades planteadas en cuanto a iluminación se refiere se hace necesaria la explotación de fuentes de energía alternativa (energía fotovoltaica), así como el control y uso eficiente de los sistemas de iluminación

Los sistemas de iluminación fluorescente presentan considerables ventajas con respecto a los sistemas de iluminación incandescente. Aunque los últimos tienen un principio de funcionamiento sencillo, presentan el inconveniente de tener bajas eficiencias puesto que gran parte de la energía luminosa es disipada en calor, lo que trae como consecuencia un gran consumo de energía. Con el uso de lámparas fluorescentes se obtienen los siguientes beneficios: menor disipación de calor, mayor tiempo de vida, mayor eficiencia, etc. Además son de bajo costo y se consiguen fácilmente. El inconveniente que se presenta, es que no se puede conectar directamente a la línea de potencia, ya que el voltaje aplicado es insuficiente para encenderla, siendo necesario el uso de un elemento auxiliar llamado balastro (figura 1).

En general, los sistemas de iluminación con lámparas fluorescentes requieren de un balastro para su correcto funcionamiento. Inicialmente se utilizaron balastros electromagnéticos ya que son muy simples, robustos, económicos y soportan un amplio rango de temperaturas. Sin embargo, son pesados y voluminosos, trabajan a bajas frecuencias de 50 o 60 Hz, a esta frecuencia producen un efecto estroboscópico en la luz (flickering) y no pueden controlar la intensidad luminosa. Para contrarrestar estas deficiencias aparecieron los balastros electrónicos. Los avances logrados con estos dispositivos a la fecha demuestran que los balastros electrónicos tienen enormes ventajas con respecto a los electromagnéticos convencionales.

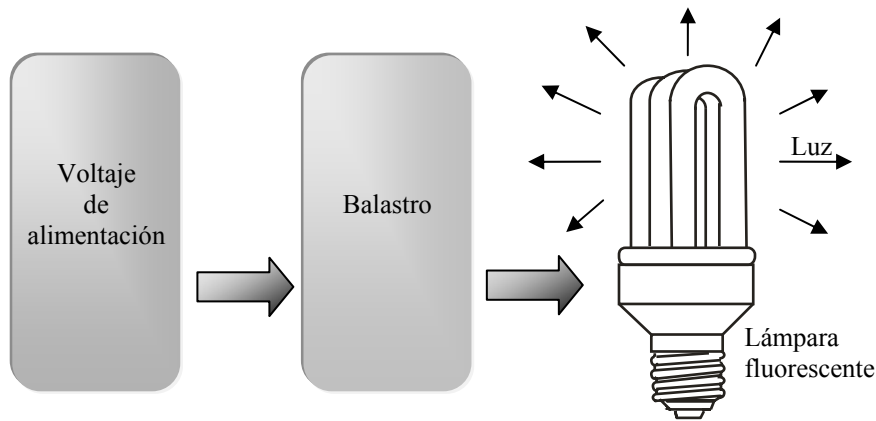


Figura 1 Elementos de un sistema de iluminación utilizando lámparas fluorescentes

Los balastos electrónicos comerciales basan su principio de funcionamiento en un inversor, cuya estructura puede ser de medio puente, Push-Pull o de puente completo. En estos circuitos se utilizan 2 o 4 transistores y se controlan con técnicas PWM (Modulación por ancho de pulso), la frecuencia máxima de operación en estos balastos no puede ser mayor de 50 kHz [URL4], ya que hay demasiadas pérdidas en los interruptores.

Las tendencias en investigación en cuanto a balastos electrónicos se refiere se enfocan en buscar estructuras sencillas y trabajar a altas frecuencias de conmutación, con la finalidad de aumentar la eficiencia, y la densidad de potencia.

Manteniendo dicha tendencia, en esta tesis se plantea el diseño y construcción de un balastro electrónico alimentado con CD, con una frecuencia de conmutación de 700 kHz. El componente principal es el Amplificador Clase E Conmutado a Voltaje Cero (ACECVC) por su estructura sencilla ya que cuenta con un solo interruptor, y sus altas eficiencias de conversión de potencia.

Para cumplir con el cometido se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Diseñar y construir un balastro electrónico para encender una lámpara fluorescente de arranque instantáneo de 21 Watts, utilizando el ACECVC como inversor, con una frecuencia de conmutación de 700 kHz.

Objetivos particulares:

- Acoplo de impedancias del ACECVC y el tanque resonante.
- Analizar, seleccionar y diseñar el tanque resonante.
- Diseñar el circuito oscilador-impulsor.
- Diseñar los elementos magnéticos.
- Diseño del programa de cómputo.

- Elaborar el circuito impreso del sistema.
- Pruebas y captura de resultados finales.

Contenido de la tesis

El trabajo de tesis se ha organizado de la siguiente manera:

En el capítulo uno se presenta una descripción de las características generales de las lámparas eléctricas, además de una comparación entre las lámparas incandescentes y las de descarga gaseosa, así como una descripción de las características y el funcionamiento de la lámpara fluorescente.

En el capítulo dos se presenta un estudio de los balastos existentes, así como una descripción de las características generales de los inversores que son utilizados en balastos electrónicos, el estudio y selección del tanque resonante.

En el capítulo tres se presenta el diseño del balastro electrónico. Tal diseño comprende: el cálculo de la resistencia interna de la lámpara fluorescente; los elementos del circuito oscilador-impulsor, el ACECVC basado en [24] [11] [9] y el tanque resonante, así como el diseño de los inductores con núcleo de ferrita. Todo implementado en un programa de cómputo desarrollado en C++ Builder como herramienta de diseño.

En el capítulo cuatro se presentan las simulaciones de los datos obtenidos en el programa de diseño del balastro electrónico utilizando el software PSpice, además de una comparación entre los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio y las gráficas obtenidas.

En el capítulo cinco se presentan las conclusiones, observaciones y los trabajos futuros.

1. Lámparas de descarga

En este capítulo se proporciona una descripción general de los tipos de lámparas existentes en la actualidad. Así como las características, principio de funcionamiento y un estudio del comportamiento eléctrico en alta y baja frecuencia de la lámpara fluorescente.

1.1 Introducción

La electricidad es una fuente de energía indispensable en nuestra vida cotidiana, puesto que con ella se obtiene calor, movimiento y se genera luz. Actualmente una gran cantidad de energía eléctrica se destina a los sistemas de iluminación, esta energía se utiliza para adecuar espacios, decorar y en el alumbrado público. Por este motivo, actualmente se buscan estrategias que permitan lograr un uso más eficiente de la energía eléctrica en el sector de la iluminación.

Una de las soluciones para mejorar los sistemas de iluminación es el uso de lámparas de descarga, que en comparación a las lámparas incandescentes, presentan diversas ventajas como son: mayor duración de la lámpara, menor disipación de potencia en calor y menor consumo de energía, entre otras.

A continuación se describen algunas propiedades de la luz, el principio de funcionamiento, ventajas y desventajas de las lámparas eléctricas.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Naturaleza de la luz

La luz es un fenómeno físico que se manifiesta en forma de energía luminosa y se propaga en forma de ondas electromagnéticas, en la figura 1.1 se muestran las características de las ondas electromagnéticas en función de las longitudes de onda, debido a esto, las ondas se encuentran en bandas distintas y se identifican con diferentes nombres. En la región visible se encuentra la forma de radiación sensible al ojo humano, esta región aproximadamente abarca entre los 380nm y 770nm [10] .

1.2.2 Clasificación de las fuentes luminosas

Las fuentes luminosas se clasifican de acuerdo al tipo de luz que generan y pueden ser naturales y artificiales.

- *Las fuentes luminosas naturales* son aquellas que producen radiación visible por causas naturales, por ejemplo la radiación proveniente del sol, las estrellas, los rayos y otros, como algunos animales.
- *Las fuentes luminosas artificiales* son creadas por la manipulación del hombre.

En la tabla 1.1 se muestran algunos ejemplos de fuentes luminosas que existen en la actualidad [18] [URL1] [URL2] .

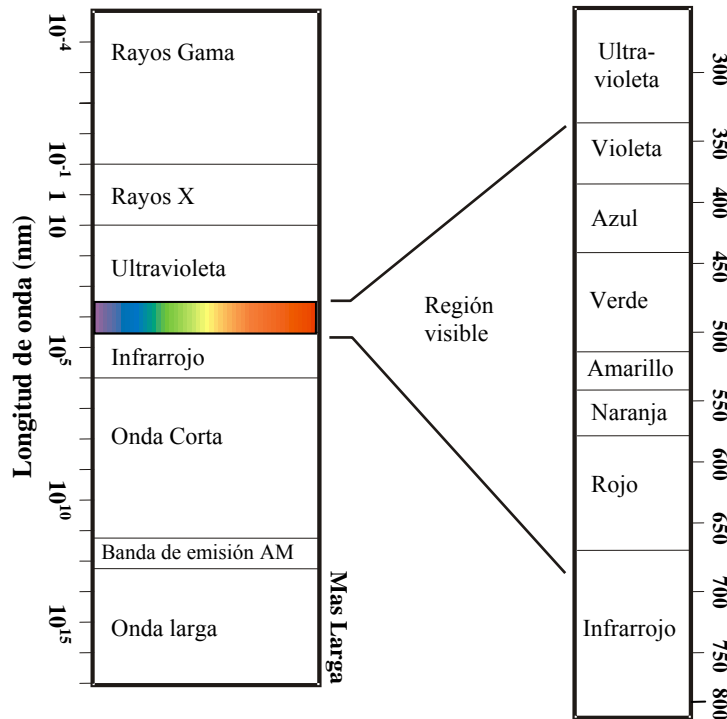




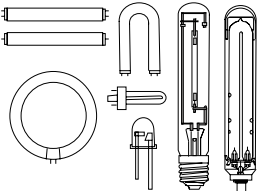

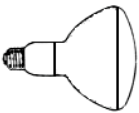
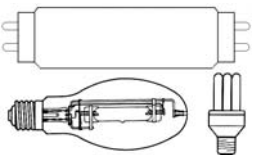


Figura 1.1 Diagrama del espectro electromagnético

Tabla 1.1 Clasificación de las fuentes luminosas

	Emisión térmica	Emisión luminiscente (eléctricas)	Emisión luminiscente (no eléctricas)
Fuentes luminosas naturales	 Sol	 Rayos	 Luciérnaga
Fuentes luminosas artificiales	 Lámpara incandescente Lámpara halógena	 Lámparas luminiscentes	 Elementos Radiactivos Artificiales
	 Lámparas de luz mezcla	 Lámparas fluorescentes	

1.2.3 Clasificación de las fuentes luminosas de acuerdo a la transformación de energía

Las fuentes luminosas artificiales de la tabla 1.1 también se pueden clasificar según el tipo de transformación de energía que utilizan [URL7] :

- *La termorradiación* se conoce como la radiación calorífica térmica, la cual depende de la temperatura del cuerpo emisor. A la parte de esta radiación emitida dentro del espectro visible se le denomina radiación por incandescencia. Dentro de este grupo se encuentran la luz natural del sol y la luz artificial de las lámparas incandescentes y las incandescentes halógenas.
- *La luminiscencia* es la radiación emitida por un cuerpo cuyos átomos son excitados por un agente externo. Dependiendo del agente, la luminiscencia se puede clasificar en eléctricas y no eléctricas:

Luminiscencias Eléctricas:

- *Electroluminiscencia*: se produce cuando la luz es generada por una corriente eléctrica que pasa a través de ciertos sólidos (*LEDs*).
- *Fotoluminiscencia*: se produce cuando la radiación es absorbida por un sólido y reemitida en una longitud de onda diferente.
 - *Fluorescencia*: Conversión de radiación ultravioleta en visible.
 - *Fosforescencia*: Fotoluminiscencia retardada, en la que existe emisión de luz durante cierto tiempo después que ha cesado la excitación.

Luminiscencias no eléctricas: emisión de luz producida por causas diversas.

- *Bioluminiscencia* por organismos vivientes.
- *Triboluminiscencia* fricción de algunos materiales.
- *Radioluminiscencia* producida por la acción de los materiales radiactivos.
- *Quimioluminiscencia* es causada por reacciones químicas.

Este trabajo se enfoca a la generación de luz artificial, utilizando para ello una lámpara que funciona como un convertidor de energía (convierte energía eléctrica en radiación electromagnética visible). Para el diseño del sistema de iluminación es necesario conocer ciertas características importantes de la lámpara, así como algunos términos básicos y las propiedades cromáticas inherentes a las mismas [20] .

1.2.4 Propiedades cromáticas de las fuentes luminosas

En general se usan dos sistemas para medir las propiedades cromáticas de una fuente luminosa artificial que son [20] : la temperatura del color y el índice de rendimiento del color (IRC).

1.2.4.1 Temperatura del color

El color de la luz de una lámpara artificial se mide por su apariencia cromática, y está basada en el siguiente principio: que todos los cuerpos al aumentar su temperatura emiten luz, mientras más alta es la temperatura, más azul o fría es la luz; mientras más baja es la temperatura, más cálida y rojiza es la luz. La escala es una comparación de la temperatura que se tendría al calentar un cuerpo negro para emitir ese color, en la tabla 1.2 se tienen los diferentes tipos de tonalidades de las lámpara artificiales.

Tabla 1.2 Tipo de tonalidad de luz de las lámparas

Temperatura de color	
Luz cálida	$\leq 3300^{\circ}\text{K}$
Luz intermedia	3300 a 5000 °K
Luz de día	$\geq 5000^{\circ}\text{K}$

1.2.4.2 Índice del rendimiento del color (IRC)

El índice de rendimiento del color (*IRC*) mide la capacidad de luz para reproducir los colores, de las personas u objetos para que parezcan más naturales. Está basado en una escala de (0 – 100), entre mayor sea el IRC mejor será la calidad de luz para reproducir los colores.

1.2.5 Unidades luminosas

No toda la radiación que emite este tipo de lámpara es luz, por lo que hay ciertas escalas para su medición pero en si las que se pueden observar en este proyecto son: el flujo luminoso y la intensidad luminosa. Donde el flujo luminoso es la potencia lumínica en forma de radiación luminosa y la intensidad luminosa es la potencia que emite la fuente luminosa en cierto ángulo

1.3 Clasificación de las lámparas eléctricas

Con respecto a la clasificación anterior, en la figura 1.2 se muestran los diversos tipos de lámparas eléctricas artificiales [10] [URL1] [URL2] .

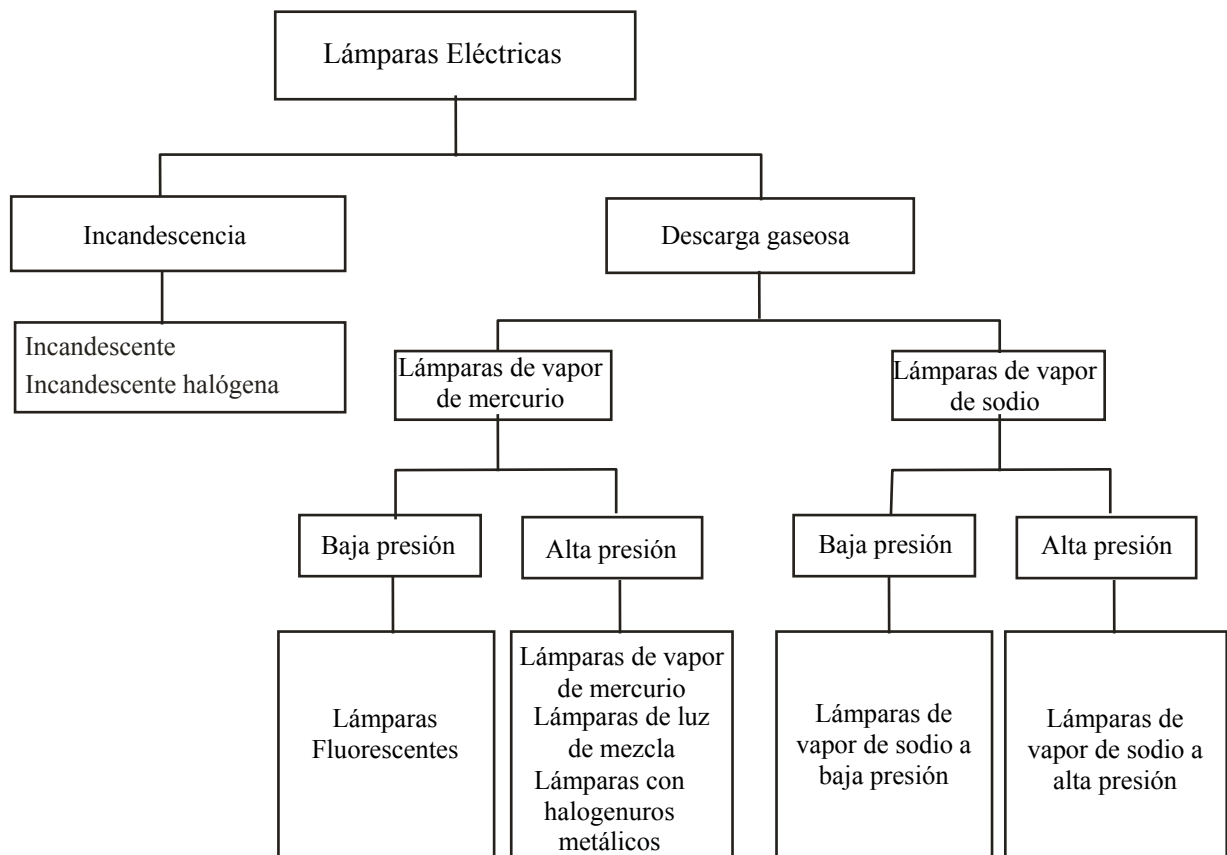


Figura 1.2 Clasificación de las lámparas Eléctricas

A continuación se realiza un estudio general de los tipos de lámparas, el cual incluye su principio de funcionamiento, principales características y algunas aplicaciones de las mismas.

1.3.1 Lámparas de incandescencia

La lámpara incandescente fue la primera en utilizarse para la generación de luz y basa su funcionamiento en el principio de la termorradiación.

1.3.1.1 Lámpara incandescente convencional

El funcionamiento de este tipo de lámpara incandescente es simple, consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por un filamento hasta que éste alcance una temperatura elevada que genere luz visible[URL5] . En la figura 1.3 se muestra el principio de funcionamiento de una lámpara incandescente.

Cualquier cuerpo caliente despedirá cierta cantidad de luz a temperaturas superiores a los 525 °C, por lo que un conductor que se calienta por encima de dicha temperatura mediante una corriente eléctrica actuará como fuente luminosa [URL6] .

En la figura 1.4 se muestran la estructura básica de una lámpara incandescente:

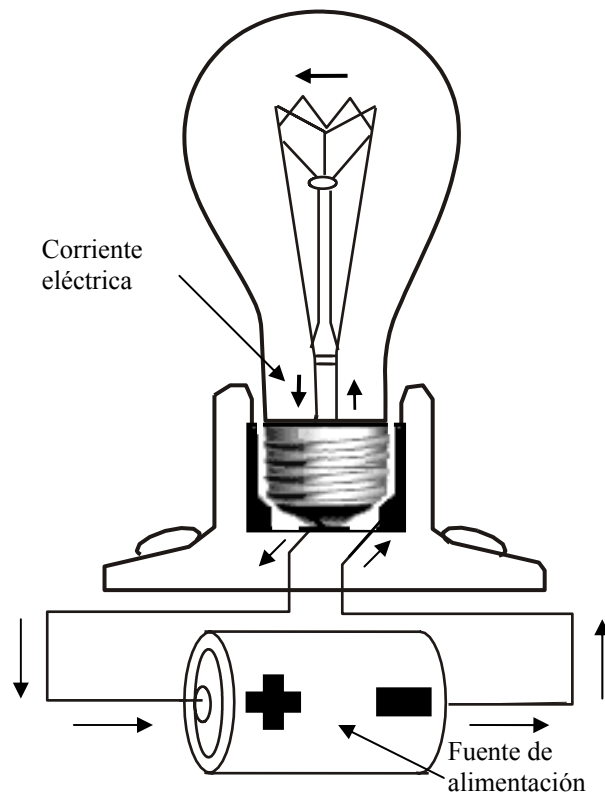


Figura 1.3 Funcionamiento de una lámpara incandescente

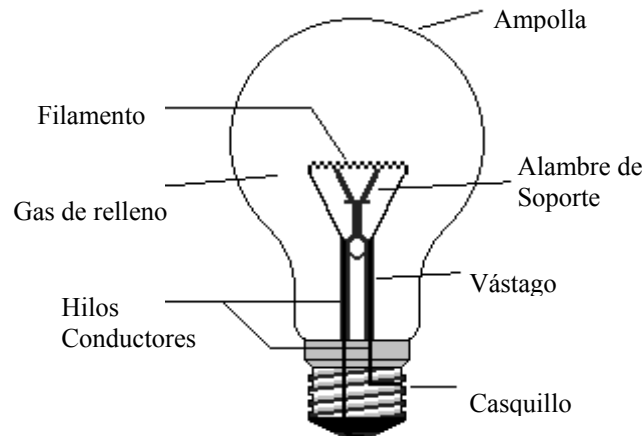


Figura 1.4 Partes de una lámpara incandescente

- *Filamento:* es un alambre enrollado que por lo general es de wolframio o tungsteno y se calienta alcanzando temperaturas tan elevadas que empieza a emitir luz visible.
- *Ampolla de vidrio:* es lo que determina la forma de la lámpara ya que existen una variedad de ellas, esta ampolla sirve para proteger que el filamento no se queme en contacto con el aire, puede estar al vacío (<25W) o relleno con un gas inerte (>25W).
- *Gas de relleno:* el gas de relleno es una mezcla de argón y nitrógeno, también se utiliza kriptón o Xenón.
- *Casquillo:* sirve para conectar la lámpara a la energía eléctrica.

Los elementos faltantes (hilos conductores, vástago y el soporte) tienen funciones de soporte y conducción de la corriente eléctrica.

1.3.1.2 Lámpara incandescente halógena

Este tipo de lámparas funcionan bajo el mismo principio que las lámparas incandescentes convencionales, pero en este caso la ampolla posee un componente halógeno agregado al gas que trabaja como elemento regenerativo, esto hace que este tipo de lámparas sean mejores que las incandescentes convencionales.

En la figura 1.5 se muestran las partes de una lámpara halógena:

- *Ampolla interior:* en los extremos de ésta hay dos casquillos cerámicos que protegen los contactos de conexión.
- *Ampolla exterior:* está formada por una ampolla cilíndrica de cuarzo para protección.
- *Filamento:* en la ampolla interior se encuentra el filamento de tungsteno enrollado en espiral.
- *Halógeno:* el tipo de halógeno¹ que contiene la lámpara en su interior generalmente es yodo.
- *Gas de relleno:* contiene un gas de relleno de nitrógeno-argón en su interior.

¹ Halógeno: son elementos que se encuentran en el grupo 17 de la tabla periódica (flúor, cloro, bromo, yodo y astato)

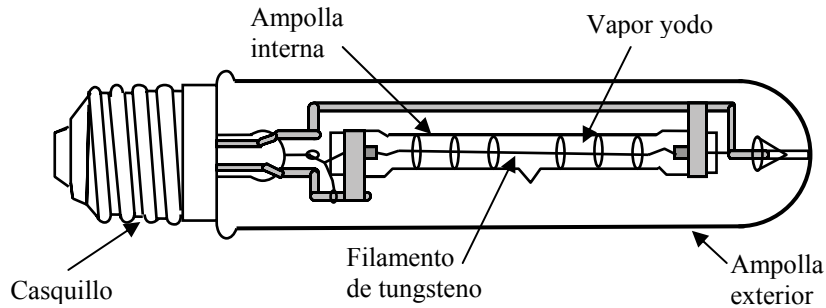


Figura 1.5 Lámpara incandescente halógena

1.3.1.3 Características de las lámparas de incandescencia

Estas lámparas tienen numerosas ventajas, debido a sus características cromáticas las cuales presentan un buen índice del color (*IRC*), emiten radiaciones en un espectro continuo, tiene una variación amplia de la intensidad luminosa, no necesitan equipos auxiliares, su encendido es instantáneo, son sencillas y económicas.

La principal desventaja que presentan es que son muy ineficientes, ya que solo el 5 % [URL24] de la energía que consumen es luz y lo demás se disipa en calor. En la tabla 1.3 se muestran sus características de duración y principales aplicaciones.

Tabla 1.3 Comparación de los tipos de lámparas

Lámparas incandescentes	Característica de duración	Aplicación
Convencionales	<ul style="list-style-type: none"> La vida de la lámpara depende de la duración del filamento. Vida media de 1000 a 2000 hrs. 	<ul style="list-style-type: none"> especialmente en el hogar
Halógenas	<ul style="list-style-type: none"> Vida media de 2000 a 5000 hrs. 	<ul style="list-style-type: none"> Interiores de vivienda Comercios Vitrinas

1.3.2 Lámparas de descarga gaseosa

Las lámparas de descarga constituyen una forma alternativa de generar luz, y su principio de funcionamiento se basa en la luminiscencia. Al someter cualquier gas ionizado y confinado en un tubo de descarga, a un voltaje elevado entre los electrodos, produce un flujo de iones negativos y positivos, a este flujo se le denomina descarga eléctrica (figura 1.6) [URL18].

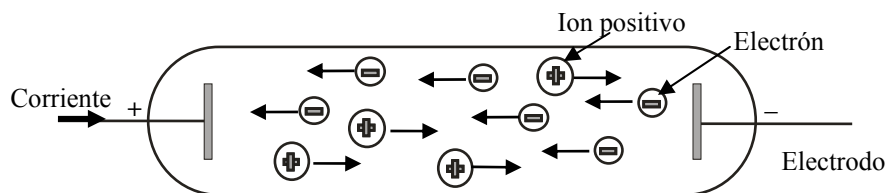


Figura 1.6 Descarga eléctrica

A diferencia de las lámparas incandescentes, la emisión de luz que produce la lámpara de descarga tiene un espectro discontinuo, es decir, presenta bandas de colores. Dependiendo del gas dentro de la lámpara y la presión a la que esté sometido, se tendrán los diferentes tipos de lámparas que hay en la actualidad, cada una de ellas con sus propias características luminosas. Este tipo de lámparas requieren de un tiempo de encendido para alcanzar las condiciones adecuadas de funcionamiento y necesitan de un elemento externo llamado balastro para su correcto funcionamiento[10] [URL12] [URL13] [URL19] .

1.3.2.1 Lámparas de vapor de mercurio

En este tipo de lámparas se encuentran las lámparas de vapor de mercurio de baja presión (lámparas fluorescentes) y las lámparas de mercurio de alta presión (lámparas de vapor de mercurio a alta presión, lámparas de luz de mezcla, lámparas con halogenuros metálicos).

1.3.2.1.1 Lámparas de vapor de mercurio a baja presión

Son las lámparas fluorescentes convencionales y se dividen en lámparas de arranque instantáneo (una terminal en cada extremo) o de arranque rápido (dos terminales en cada extremo) las cuales tienen diferentes tamaños y formas (figura 1.7) [URL9] . En el apartado 1.4 se hará un estudio más minucioso de este tipo de lámparas.

1.3.2.1.2 Lámparas de vapor de mercurio a alta presión

En este tipo de lámparas se clasifican de la siguiente manera:

- *Lámparas de vapor de mercurio a alta presión:* se conocen simplemente como de vapor de mercurio, el funcionamiento de estas lámparas se basa en el mismo principio que el de las lámparas fluorescentes. Así como una lámpara fluorescente de descarga en mercurio a baja presión genera exclusivamente radiaciones ultravioleta con altas presiones de vapor, el espectro cambia notablemente, emitiendo varias bandas que corresponden a los colores: violeta (405 nm), azul (435 nm), verde (546 nm) y amarillo (570 nm), emitiendo también una pequeña cantidad de radiaciones ultravioleta.

Como las cualidades cromáticas de estas radiaciones no resultan muy buenas, debido en gran parte a la ausencia de radiaciones rojas, las radiaciones ultravioleta se transforman, mediante sustancias fluorescentes, en radiaciones comprendidas dentro del espectro rojo, dando como resultado una lámpara con un mejor rendimiento cromático. En la Figura 1.8 se muestra como está construida la lámpara.

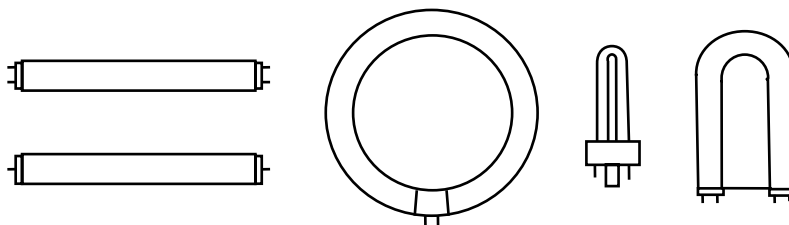


Figura 1.7 Formas de lámparas fluorescentes

Estas lámparas están constituidas por una pequeña ampolla de cuarzo, provista de dos electrodos principales y uno o dos auxiliares, en cuyo interior se encuentra una cierta cantidad de argón y unas gotas de mercurio. Todo dentro de una ampolla exterior que sirve de protección.

- *Lámparas de luz de mezcla:* se deriva de la lámpara de mercurio de alta presión. La diferencia principal entre estas dos es que, la última depende de un balastro externo para estabilizar la corriente de la lámpara, y la lámpara mezcladora posee un balastro incorporado en forma de filamento de tungsteno colocado en su interior.

El espectro de la radiación emitida por esta lámpara es el resultado de la combinación o la mezcla del espectro típico de la lámpara de vapor de mercurio, y el espectro de una lámpara de incandescencia rica en radiaciones rojas. En la figura 1.9 se muestra su estructura interna de este tipo de lámpara.

- *Lámparas con halogenuros metálicos:* esta lámpara presenta características físicas similares a las de vapor de mercurio, la diferencia es que además de mercurio, contienen halogenuros de tierras raras (disprosio, talio, indio, holmio o tulio) obteniendo mayores rendimientos luminosos y sobre todo una mejor reproducción cromática. En la figura 1.10 se muestra como está construida este tipo de lámpara.

El tubo de descarga es de cuarzo con un electrodo de wolframio en cada extremo, recubierto de un material emisor de electrones. La ampolla exterior es de vidrio duro, sirve para el equilibrio térmico del tubo de descarga y para su aislamiento.

Dado que estas lámparas no emiten radiaciones ultravioleta, eliminan la necesidad de la capa fluorescente, por lo que se suelen construir en ampollas cilíndricas y transparentes.

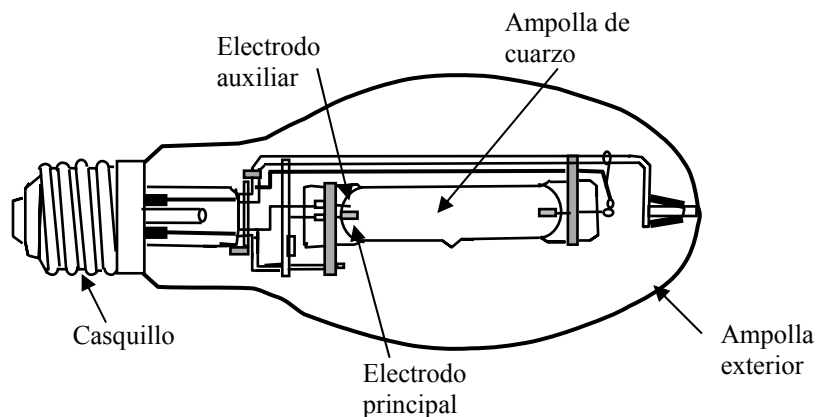


Figura 1.8 Lámpara de vapor de mercurio a alta presión

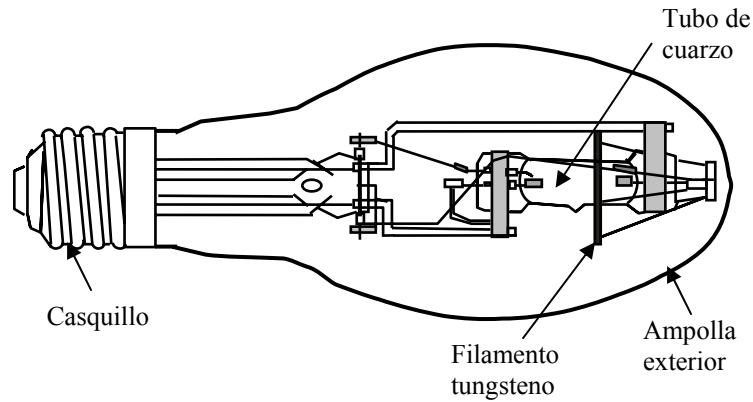


Figura 1.9 Lámpara de mezcla

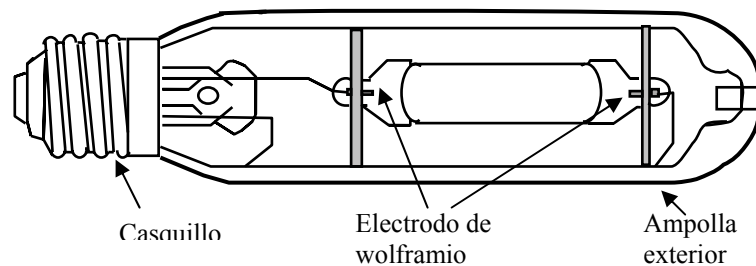


Figura 1.10 Lámpara de halogenuros metálicos

1.3.2.2 Lámparas de vapor de sodio

En este tipo de lámparas se clasifican en lámparas de vapor de sodio de baja presión y alta presión

1.3.2.2.1 Lámparas de vapor de sodio de baja presión

- *Lámparas de vapor de sodio a baja presión:* como se muestra en la figura 1.11 están formadas por dos ampollas de vidrio tubulares. La ampolla interna o tubo de descarga tiene forma de U y en su interior se encuentra una pequeña cantidad de gas neón a baja presión y sodio puro en forma de gotas, cuando está frío; asimismo, en los extremos del tubo de descarga se encuentran dos electrodos de filamento de wolframio.

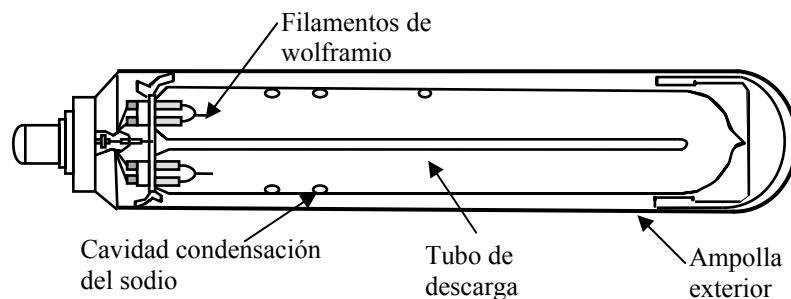


Figura 1.11 Lámpara de vapor de sodio a baja presión

Al aplicar tensión entre los electrodos, se produce la descarga a través del gas neón, la cual determina la emisión de una luz roja característica de este gas. El calor generado por la descarga produce la vaporización progresiva del sodio y, como consecuencia, produce una luz de color amarilla monocromática en una longitud de onda de 589 nm.

1.3.2.2 Lámpara de vapor de sodio de alta presión

- *Lámpara de vapor de sodio a alta presión:* es básicamente una lámpara de sodio de baja presión, con la diferencia que se aumenta la presión del sodio en el interior de la lámpara y trabaja a altas temperaturas, además tiene un gas xenón con una pequeña cantidad de mercurio para mejorar el espectro. La figura 1.12 muestra las partes de este tipo de lámparas.

El tubo de descarga se aloja en el interior de una ampolla exterior, la cual es resistente a la intemperie, sirve de protección, aislamiento eléctrico y térmico. La despreciable cantidad de radiaciones ultravioleta que generan estas lámparas hace innecesario el empleo de material fluorescente, por lo que esta ampolla es totalmente transparente.

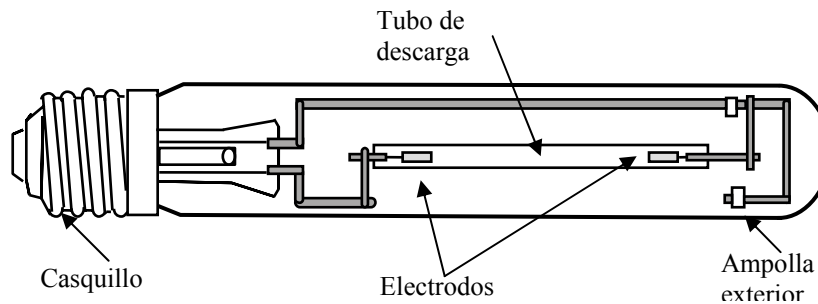


Figura 1.12 Lámpara de vapor de sodio a alta presión

1.3.2.2.3 Características de las lámparas de descarga

En la tabla 1.4 se muestran las principales aplicaciones, el tiempo de vida y algunos factores que afectan el correcto funcionamiento de las lámparas de descarga.

Tabla 1.4 Características de las lámparas de descarga

Lámparas de descarga	Características de duración	Aplicaciones
Lámparas vapor de mercurio de baja presión (lámparas fluorescentes)	<ul style="list-style-type: none"> • La vida de la lámpara depende de la calidad de los electrodos. • La vida de la lámpara termina cuando la sustancia emisiva de los cátodos desaparece. • Vida media 8,000 hrs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Interiores • Industria • Fines decorativos • Escuelas • Oficinas
Lámparas de vapor de mercurio de alta presión	<ul style="list-style-type: none"> • Mismo principio que las lámparas fluorescente • Vida media entre 12,000 y 16000 hrs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alumbrados de calles • Áreas deportivas • Filmaciones y transmisión por TV • Plazas • Estacionamientos • Parques
Lámparas de vapor de sodio de baja presión	<ul style="list-style-type: none"> • Vida media de 10,000 hrs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alumbrado público de puentes • Cruces ferroviarios
Lámparas de vapor de sodio de alta presión	<ul style="list-style-type: none"> • Vida media de 20,000 a 24,000 hrs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminación pública • Estacionamientos • Grandes áreas • Fachadas • Parques • Depósitos industriales.

1.4 Lámpara fluorescente

La lámpara fluorescente es un dispositivo de descarga eléctrica empleado para aplicaciones generales de iluminación. Se trata de una lámpara de vapor de mercurio de baja presión contenida en un tubo de vidrio, revestido en su interior con un material fluorescente [URL10].

1.4.1 Partes de una lámpara fluorescente

En la figura 1.13 se muestra las partes de una lámpara fluorescente:

- *Tubo de descarga*: es un tubo de diámetro normalizado, típicamente la forma es un cilíndrico cerrado, sin embargo existen otras formas como las circulares, en U o compactas.
- *Casquillos*: se localizan en cada extremo de la lámpara, tiene uno o dos terminales dependiendo del tipo de lámpara si es de arranque instantáneo o rápido.
- *Electrodos*: son fabricados en tungsteno, normalmente en doble espiral y recubiertos por sustancias emisivas. La calidad de estos determina la duración de la lámpara, puesto que cuando uno de los electrodos pierde esta sustancia, la lámpara no consigue encenderse.
- *Gas de llenado*: el tubo de descarga está relleno con vapor de mercurio a baja presión y una pequeña cantidad de un gas inerte que sirve para facilitar el encendido y controlar la descarga de electrones. Las funciones que realiza el gas de llenado son las siguientes:
 - Facilitar el inicio de la descarga, por reducción de la tensión de encendido.
 - Facilitar el recorrido de los electrones.
 - Proteger la sustancia emisiva de los electrodos.
 - Los gases comúnmente empleados son: argón o mezcla de argón-neón y kriptón.
- *Recubrimiento fluorescente*: En la actualidad se usan dos tipos de polvos: los que producen un espectro continuo y los trifósforos que emiten un espectro de tres bandas con los colores primarios. De la combinación estos tres colores se obtienen una luz blanca que ofrece un buen IRC.

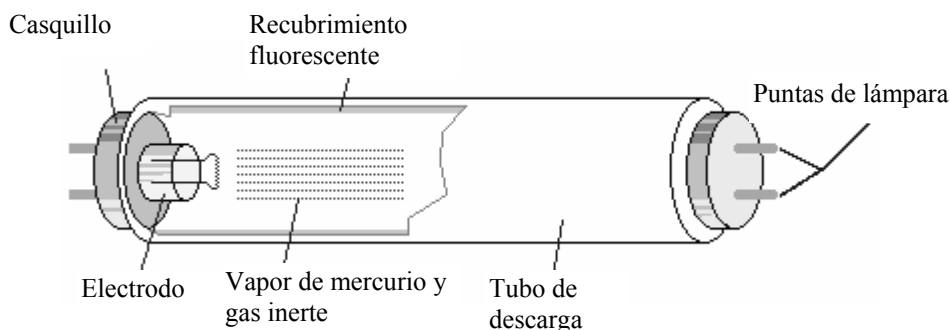


Figura 1.13 Partes que constituyen una lámpara fluorescente

1.4.2 Principio de funcionamiento

El tubo fluorescente es en un tubo de vidrio al vacío, el cual contiene una pequeña cantidad de mercurio y un gas inerte (habitualmente argón) a baja presión, esta mezcla de gases en el tubo tiene una elevada resistencia al paso de la corriente eléctrica.

Como se observa en la figura 1.14 en cada extremo del tubo debe haber uno o dos electrodos, formados por un filamento de tungsteno recubierto de una sustancia emisiva, que emite electrones con facilidad, al aplicarle una diferencia de potencial elevada o un precalentamiento entre ellos, cuando el gas está en un estado altamente ionizado conduce corriente eléctrica con facilidad, esto quiere decir que estas descargas provocan un flujo de electrones que atraviesan el gas, al chocar los electrones con las capas externas de los átomos de mercurio les transmiten parte de su energía, al hacerlo liberan energía en forma de radiación ultravioleta² [URL8] [URL18] .

La consecuencia de esto, es que la energía electromagnética emitida por la lámpara no es blanca y puede ser nociva para la salud. Para que estas radiaciones sean útiles, la superficie interna del tubo está cubierta de un material fluorescente (usualmente fósforo), que absorbe la luz ultravioleta y la transforman en luz visible.

1.4.2.1 Estado de la descarga en los gases

En la figura 1.15 se muestra el proceso de encendido de las lámpara de arranque instantáneo, donde los gases se transforman de un material no conductor a conductor, mediante la aplicación de un alto voltaje eléctrico [URL20] [URL21] [URL22] [URL23] .

En la misma gráfica se puede observar el comportamiento de la lámpara como una resistencia negativa, es decir, cuando se incrementa, la corriente en el interior del tubo, menor es la resistencia. Si no se controla, puede ocasionar la destrucción de la lámpara. Por tal motivo, las lámparas fluorescentes necesitan la presencia de un elemento auxiliar para limitar la corriente que está circula por ella y proporciona el voltaje de encendido.

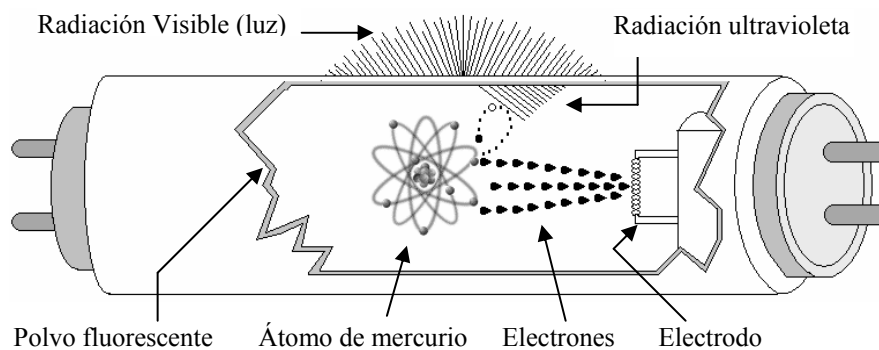


Figura 1.14 Funcionamiento lámpara fluorescente

² Radiación ultravioleta (UV con una λ de 253.7 nm)

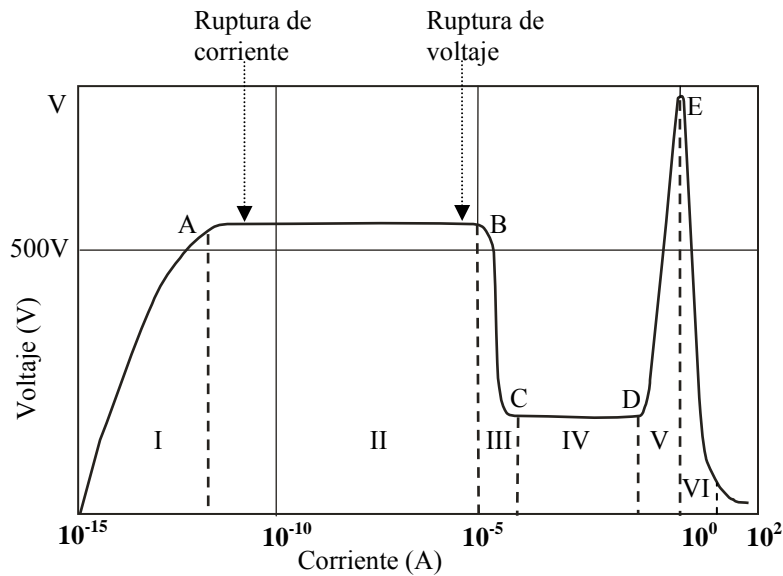


Figura 1.15 Ruptura de descarga en los gases

A continuación se describe cada una de las etapas del proceso de ruptura de los gases.

En la etapa I, conocida como la “etapa de Geiger”, aparece una pequeña corriente a medida que el voltaje se incrementa.

En la etapa II, conocida como la “etapa de Townsend”, se mantiene el voltaje pero hay un incremento de la corriente, sin embargo la ionización es tan pequeña que no se observa emisión de luz en el punto de ruptura de la descarga, la cual se vuelve autosostenida. La corriente sigue aumentando cada vez más disminuyendo la resistencia interna hasta el punto de ruptura del voltaje.

En la etapa III, conocida como caída catódica, los iones bombardean a los electrodos con tal intensidad que son capaces de desprender electrones manifestándose como una caída de voltaje, y es donde se observan las primeras emisiones luminosas.

En la etapa IV, conocida como “descarga de Glow normal”, comienza la descarga luminosa, y el área de descarga se va ensanchando hasta cubrir todo el cátodo.

En la etapa V, conocida como “descarga de Glow anormal”, el gas llega a su máxima ionización, es decir que cuando no queda ya más área disponible en el cátodo, la corriente se incrementa a expensas de un aumento de la tensión hasta el punto E.

En la etapa VI, conocida como la región de la descarga del arco, es donde el cátodo está caliente y comienza la emisión termoiónica y la tensión cae nuevamente.

1.4.2.2 Tiempo de máxima emisión luminosa de la lámpara fluorescente

En la figura 1.16 se muestra la gráfica del tiempo en que la lámpara fluorescente llega a su máxima emisión lumínica.

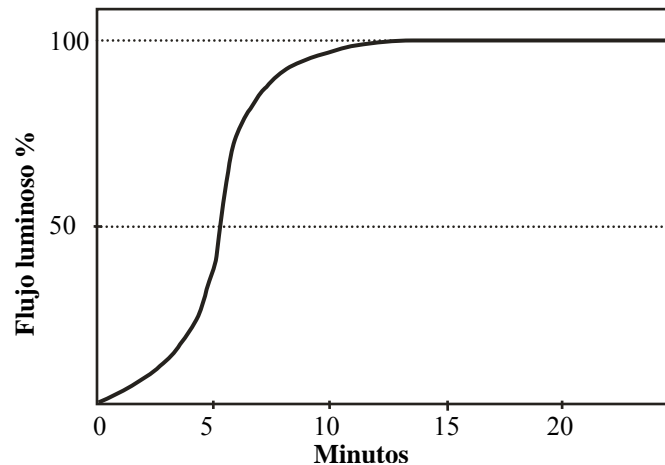


Figura 1.16 Tiempo de encendido de la lámpara fluorescente

Según [URL18] el tiempo que la lámpara fluorescente tarda para entregar su máximo flujo luminoso es aproximadamente de 10 y 12 minutos.

1.4.3 Tipos de encendidos de las lámparas fluorescentes

En general solo existen 2 tipos de estas lámparas:

- *Lámparas de arranque rápido:* como se muestra en la figura 1.17, estas lámparas se caracterizan por tener dos terminales en cada extremo. En una de estas terminales, la lámpara tiene una resistencia que funge como electrodo. Al calentarse esta resistencia por efecto Joule experimenta el fenómeno de emisión termoiónica y empieza a emitir electrones que ionizan el gas de relleno de la lámpara facilitando su encendido. Existen dos formas de encender estas lámparas de arranque rápido: el arranque con cebador que se utiliza para calentar los electrodos antes de someterlos a la tensión de arranque, y la otra forma es que simultáneamente se le suministra el voltaje de arranque y se calientan los electrodos. En ambos casos se necesita hacer eso para encender la lámpara
- *Lámparas de arranque instantáneo:* como se muestra en la figura 1.18 este tipo de lámparas se caracterizan por tener una terminal en cada extremo ya que los electrodos no necesitan precalentamiento para iniciar la emisión de electrones. El arranque se realiza “en frío” es decir aplicando solamente una tensión suficientemente elevada en los extremos de el tubo fluorescente para encender la lámpara, ya que esta posee electrodos cuyos filamentos están especialmente preparados para un calentamiento continuo.

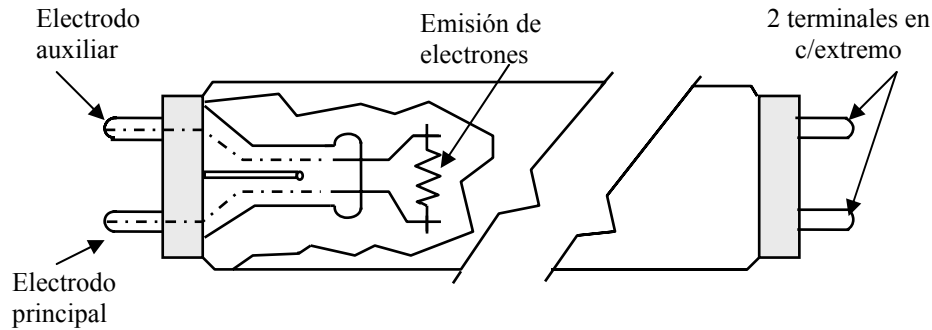


Figura 1.17 Lámpara de arranque rápido

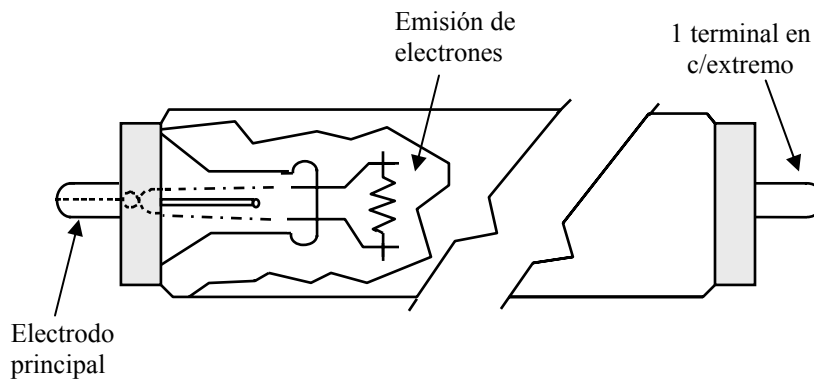


Figura 1.18 Lámpara de arranque instantáneo

1.4.4 Efecto de la frecuencia en las lámparas fluorescentes

Las lámparas fluorescentes se pueden alimentar por balastos electrónicos o por balastos electromagnéticos, estos últimos presentan desventajas físicas además de operar a una frecuencia de línea, 50 o 60 Hz, lo que provoca: el efecto estroboscópico, el desgaste de los electrodos, poca duración de la lámpara y un bajo factor de potencia.

En la actualidad, la tendencia de sustituir los balastos electromagnéticos por electrónicos ha ido en aumento, gracias a las ventajas que éstos presentan, al operar a mayores frecuencias de conmutación. A continuación se describe brevemente la operación de la lámpara fluorescente en baja y alta frecuencia [18].

1.4.4.1 Operación en baja frecuencia

Durante la operación de una lámpara en baja frecuencia, al ser alterna la tensión de alimentación, la corriente también es alterna, lo que significa que cada medio ciclo se presenta un cruce por cero y por tanto, el valor de la corriente en este punto es cero. Como la frecuencia es baja (50 o 60 Hz), la transición de positivo a negativo de la corriente de la descarga es lenta,

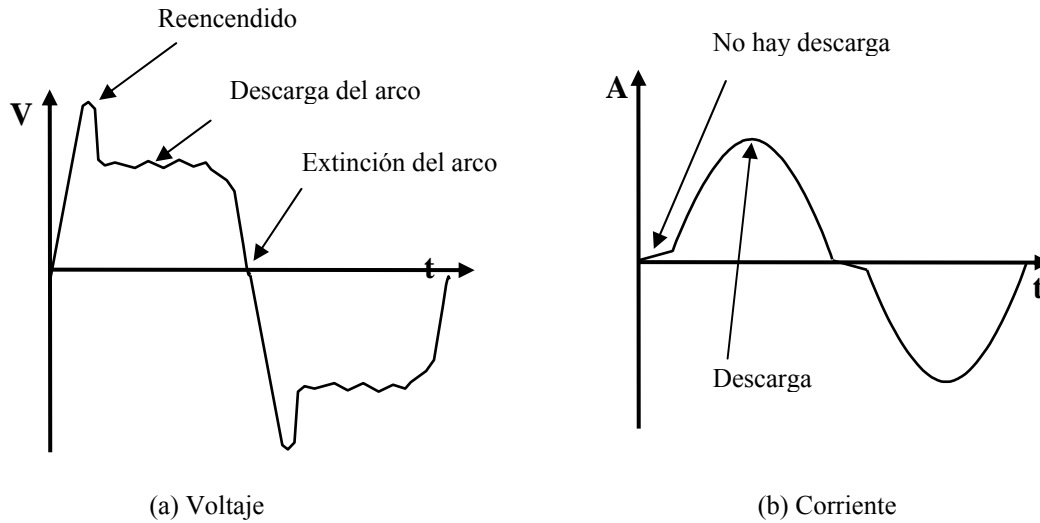


Figura 1.19 Forma de onda en baja frecuencia

el plasma³ dentro de la lámpara se enfría y el arco se extingue, lo que provoca que en cada cruce por cero el arco se extinga y se reinicie hasta que el voltaje aumente lo suficiente para que vuelva a ocurrir la descarga. Las formas de onda de la corriente de descarga y de la tensión en baja frecuencia son similares a las que se presentan en la figura 1.19.

Como se puede apreciar en la figura 1.19, los resultados de la operación en baja frecuencia son formas de onda de corriente y voltaje distorsionadas. Los reencendidos cada medio ciclo hacen que la lámpara parpadee, ocasionando que se presente el efecto estroboscópico en la luz emitida por la lámpara, además de que estas señales provoca un mayor desgaste de los electrodos y en consecuencia una disminución en la vida útil de la lámpara.

1.4.4.2 Operación en alta frecuencia

A medida que se aumenta la frecuencia de la tensión de alimentación, el plasma y los electrodos no se alcanzan a enfriar, por lo que la emisión de electrones es constante y la descarga permanece de manera continua sin cambios bruscos. Dado que el plasma se comporta como un conductor cuando está caliente, y si permanece constantemente caliente, se comporta como una resistencia según se puede ver en la figura 1.20. Estos efectos se presentan en frecuencias superiores a los 25 kHz.

Dentro de las principales ventajas del funcionamiento en alta frecuencia se encuentran las siguientes [18]:

- *Se eliminan los picos de voltaje debidos a los reencendidos*: la eliminación de estos picos de voltaje se refleja en una disminución aparente de la tensión de encendido como se muestra en la figura 1.20. Otra consecuencia de la eliminación de los

³ El plasma es un gas ionizado, es decir que es una especie de gas donde los átomos o moléculas que lo componen han perdido parte de sus electrones o todos ellos. Así, el plasma es un estado parecido al gas, pero compuesto por electrones, cationes (iones con carga positiva) y neutrones.

reencendidos es que, en cada reencendido, se pierde una gran cantidad de la sustancia emisiva que tienen los electrodos para la emisión termoiónica, y al eliminar tales reencendidos se pierde menos sustancia emisiva aumentando la vida media de la lámpara fluorescente.

- *Comportamiento resistivo:* el hecho de que la lámpara se comporte como una resistencia significa que las formas de onda de voltaje y corriente son completamente sinusoidales. Esto significa que se tendrá menor distorsión armónica, lo cual se refleja en un factor de potencia cercano a la unidad. También se tiene un ligero aumento en el valor eficaz de la corriente, lo cual se refleja en una mayor luminosidad, aumentando la eficiencia luminosa hasta en un 10%.
- *Eliminación del efecto estroboscópico:* como se mencionó anteriormente, en baja frecuencia, por cada cruce por cero de la tensión de alimentación el arco se extingue. Esto ocasiona que la lámpara se encienda y se apague. Este parpadeo de la lámpara es ligeramente perceptible por el ojo humano y en ciertos ambientes puede resultar muy molesto. En alta frecuencia este problema se elimina debido a que no hay reencendidos y en consecuencia la lámpara siempre permanece encendida.

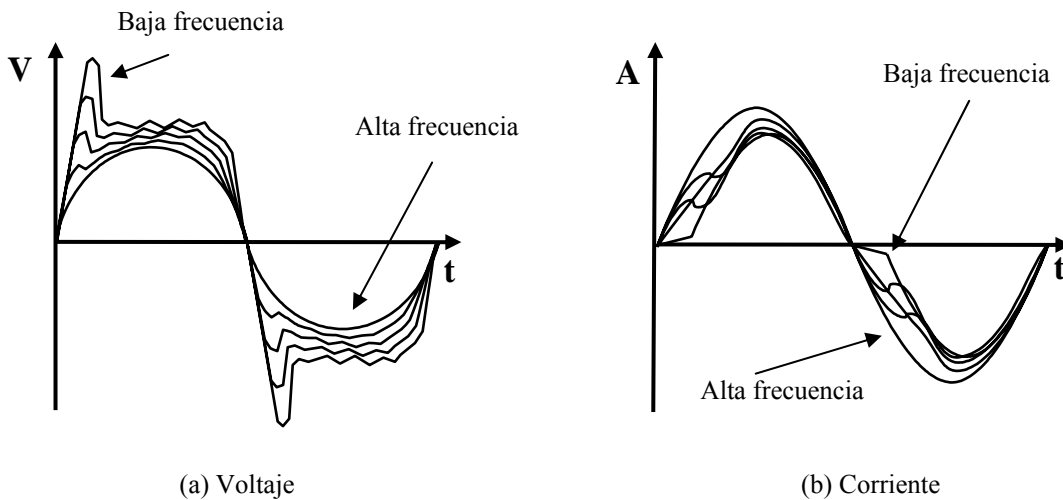


Figura 1.20 Formas de onda a medida que aumenta la frecuencia

2. Balastos

Las lámpara fluorescente presentan ventajas que hacen viable su uso con respecto a las lámparas incandescentes, aunque todas las características de este tipo de lámparas son importantes, el elemento imprescindible para el funcionamiento del sistema de iluminación es el balastro. En este capítulo se presenta una descripción de los tipos de balastro para las lámparas fluorescentes, la función que desempeñan, así como la comparación de los balastos electromagnéticos y electrónicos, haciendo énfasis en estos últimos, además de las diferentes configuraciones de los principales tipos de convertidores CD-CA (inversores) y la configuración de tanque resonante y sus respectivas ventajas.

2.1 Introducción

Los balastos son parte fundamental de las lámparas de descarga gaseosa, dentro de sus funciones se encuentran: generar el voltaje de encendido de la lámpara, limitar la corriente de la misma y estabilizar la descarga en el interior del tubo. Asimismo es importante mencionar que ambos equipos son complementarios es decir, la lámpara no funcionaria sin el balastro y el balastro no tiene razón de ser sin la lámpara de descarga como se muestra en la figura 2.1 [URL18].

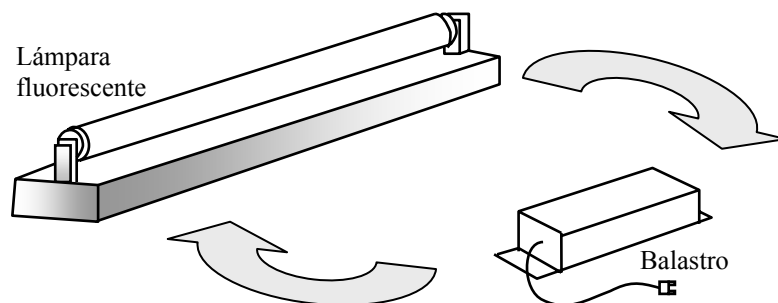


Figura 2.1 Balastro de una lámpara de descarga

Los balastos consisten de una reactancia formada por una bobina de tipo inductivo, que satisfacen los requisitos de funcionamiento aunque de forma poco eficiente desde el punto de vista energético.

Las investigaciones realizadas en este campo permitieron averiguar que al incrementar la frecuencia de operación en el tubo de descarga, aumenta su eficacia luminosa (más cantidad de luz aportada por cada unidad de potencia eléctrica), y así surgieron los balastos electrónicos los cuales presentan las siguientes características [18] :

- Disminución del voltaje de encendido de la lámpara.
- Reducción de los componentes del balastro.
- La lámpara se comporta como una resistencia.
- Se elimina el efecto estroboscópico.
- Se tiene una mayor duración de la lámpara.

2.2 Balastos para lámparas de descarga

El balastro es un elemento imprescindible para la operación correcta de una lámpara de descarga, este elemento auxiliar cumple con las siguientes funciones para evitar la destrucción de la lámpara:

- Proveer una cantidad controlada de energía para el arranque o precalentamiento de los electrodos de la lámpara.
- Suministrar la tensión y corriente controlada tanto para iniciar el arco entre los electrodos de la lámpara, como para su funcionamiento.
- Controlar y limitar la energía eléctrica en los valores adecuados.

2.2.1 Clasificación de los balastos

En general, los balastos para lámparas fluorescente se pueden dividir en dos grupos: los balastos electromagnéticos y los balastos electrónicos cada uno tiene sus propias características y funciones. Estos últimos han tenido gran importancia debido al mejor aprovechamiento de la energía que consumen y por el manejo apropiado de la lámpara fluorescente.

2.2.1.1 Balastro electromagnético

Los balastos electromagnéticos son dispositivos que se alimentan con corriente alterna y por consiguiente operan a frecuencia de línea, 50 ó 60Hz, esto hace que el dispositivo genere un ligero zumbido audible y al momento de estar encendida la lámpara produce el efecto estroboscópico, que es el parpadeo de la emisión luminosa a dicha frecuencia de línea.

2.2.1.1.1 Tipos de balastos electromagnéticos para lámparas fluorescentes

En la figura 2.2, se muestran las distintas formas de balastos electromagnéticos para encender las lámparas fluorescentes [10] y se clasifican en: arranque por cebador figura 2.2(a),

y arranque por autotrasformador para encendido instantáneo en la figura 2.2(b) y para encendido con precalentamiento de electrodos en la figura 2.2(c).

2.2.1.1.2 Partes de un balastro electromagnético

Los balastros de la figura 2.2 están formados por una bobina de hilo de cobre esmaltado con su correspondiente núcleo magnético, el conductor esta impregnado con resinas al vacío, con esto se consigue un aumento de la rigidez dieléctrica de la bobina, además de una mejor disipación del calor y una total eliminación de las posibles vibraciones del núcleo magnético, todo este conjunto se introduce dentro de un contenedor metálico como se muestra en la figura 2.3.

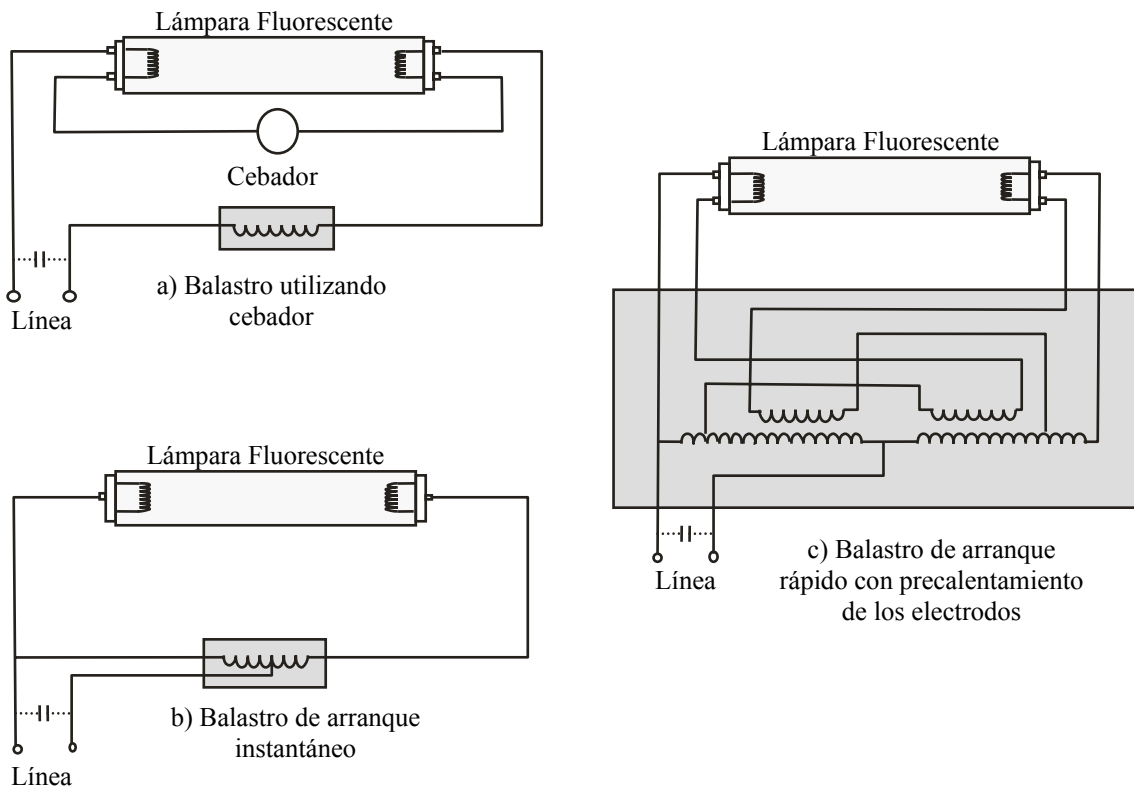


Figura 2.2 Tipos de balastros para lámparas fluorescentes

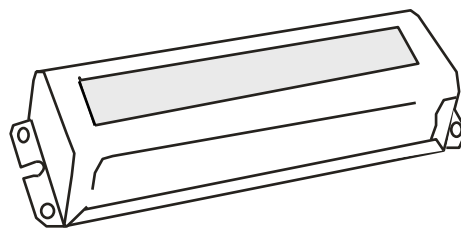


Figura 2.3 Contenedor metálico del balastro

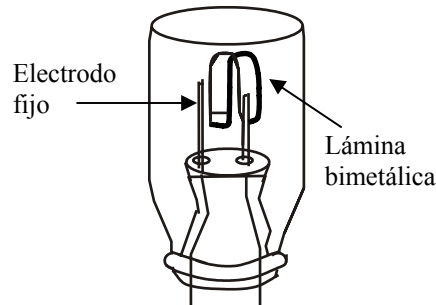


Figura 2.4 Construcción interna de un cebador

En el caso del encendido por cebador, aparte de la bobina tiene un elemento extra (figura 2.4) que consiste en una pequeña ampolla de vidrio llena de gas argón a baja presión, y en cuyo interior se encuentran dos electrodos; uno de ellos tiene una laminilla metálica (con un coeficiente de dilatación) que, por la acción del calor se puede doblar ligeramente, lo cual ayuda a generar un pico de voltaje necesario para encender la lámpara de descarga, esto lo hace repetidamente hasta que se encienda por completo. En paralelo con los electrodos se encuentra un capacitor cuya finalidad es la de evitar las interferencias en las bandas de radiodifusión o TV, que el interruptor automático pueda ocasionar.

2.2.1.2 Balastro electrónico

Los balastos electrónicos para lámparas fluorescentes se pueden alimentar de dos formas:

- *Alimentado con corriente alterna (CA)*: comercialmente esta estructura es la más utilizada, se conectan directamente a la línea eléctrica, por lo que estos sistemas tienen una etapa de rectificación, filtrado y corrección del factor de potencia, su estructura interna se muestra en la figura 2.5 [15].
- *Alimentado con corriente directa (CD)*: en la actualidad estos sistemas tienen gran aplicación, puesto que son alimentados con energías alternativas, como la solar, considerada como fuente inagotable de electricidad. Estos sistemas son muy utilizados en casas de campo, zonas rurales alejadas de la línea de distribución o zonas de acceso remoto. En la figura 2.6 se presenta el esquema típico de un balastro electrónico alimentado con corriente directa.

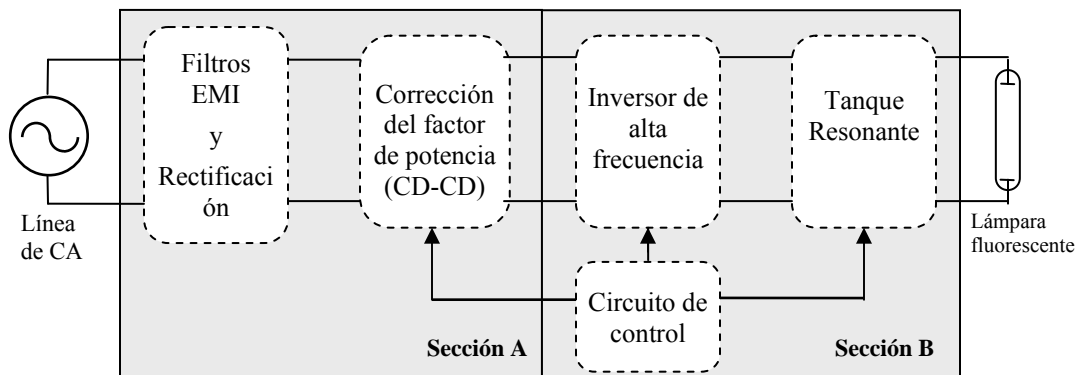


Figura 2.5 Partes de un balastro electrónico convencional

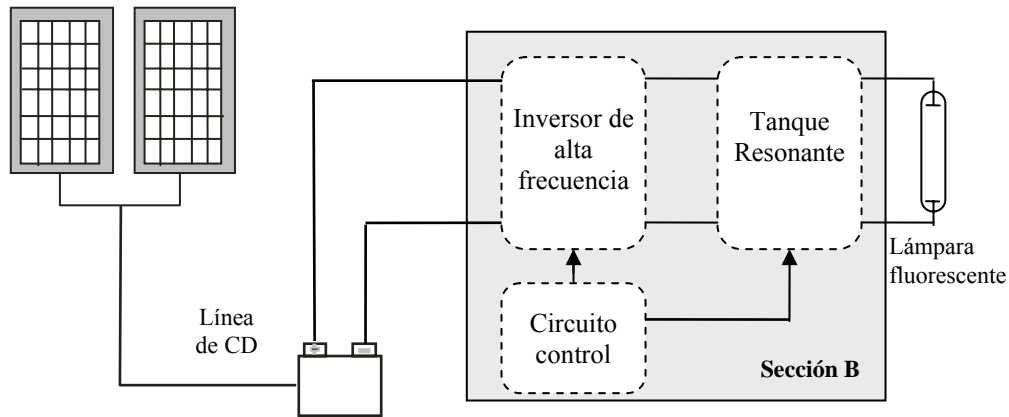


Figura 2.6 Diagrama a bloques de un Balastro Electrónico.

Un aspecto importante en la construcción de un balastro electrónico es el aumento de la frecuencia de conmutación. Esto trae como consecuencia altas eficiencias de funcionamiento, reducción en el tamaño y peso de los elementos pasivos del circuito, dando lugar a topologías con estructura simple y altas densidades de potencia. Asimismo se incrementa la eficiencia y la vida útil del tubo fluorescente, dando lugar a sistemas de iluminación con mejores prestaciones que contribuyan al ahorro de energía. Ahora bien, las causas que pueden acotar el crecimiento de la frecuencia de conmutación son las pérdidas en conmutación que tienen los elementos semiconductores de potencia (MOSFETS, IGBT, diodos rápidos).

2.2.1.3 Comparación entre los balastos

En la tabla 2.1 se muestra una comparación de las características entre los balastos electromagnéticos y electrónicos.

Tabla 2.1 Comparación entre los Balastos electrónicos y electromagnéticos

Balastos Electromagnéticos	Balastos electrónicos
1. Se alimentan con CA	1. En general, se alimentan con CD
2. Pueden ser de alto o bajo factor de potencia (capacitores)	2. Pueden ser de alto o bajo factor de potencia (activos, pasivos o híbridos)
3. No permiten un control de intensidad luminosa	3. Permiten el control de intensidad luminosa.
4. Operan a baja frecuencia (50 o 60 Hz)	4. Trabajan en alta frecuencia (>25 kHz.)
5. Son pesados y voluminosos	5. Son más ligeros y ocupan menos espacio
6. Producen ruido audible (zumban)	6. Pueden regular la intensidad luminosa ante variaciones de la tensión de alimentación por envejecimiento o variaciones de temperatura
7. No regulan las variaciones del voltaje de alimentación	7. Generalmente son más costosos que los electromagnéticos
8. Son económicos	

2.3 Inversor resonante

Para alimentar una lámpara fluorescente por medio de un balastro electrónico se emplea un inversor resonante (figura 2.7) [16], el cual está formado por un inversor de alta frecuencia y un tanque resonante. En general un inversor se conoce como un convertidor de CD a CA, es decir que la función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada CD a un voltaje simétrico de salida de CA, con la magnitud y frecuencia deseada [22].

El inversor tiene conectado un tanque resonante, el cual proporciona los niveles de voltaje y corriente adecuados para que la lámpara funcione correctamente. Las altas frecuencias de funcionamiento generan pérdidas de conmutación en los dispositivos de potencia.

En general las pérdidas que se generan en los dispositivos semiconductores de potencia dependen del tipo de conmutación [9]:

- *Conmutación dura:* en este tipo de conmutación se presenta al mismo tiempo un traslape de corriente y voltaje durante los transitorios de encendido y apagado. Por lo tanto, la conmutación dura de un dispositivo semiconductor de potencia se puede presentar tanto en la fase de encendido, como en la fase de apagado.
- *Conmutación suave:* este tipo de conmutación se divide en conmutación a voltaje cero y conmutación a corriente cero. Con la conmutación a voltaje cero se pretende que los DSEP se enciendan ante condiciones de voltaje cero (*CVC*), es decir que el voltaje sea cero justamente antes del encendido del dispositivo, también se reducen las pérdidas en el apagado gracias a la suave caída del voltaje. Por su parte la conmutación a corriente cero (*CCC*) no genera pérdidas en el apagado, forzando a que la corriente en el interruptor sea cero antes de que el voltaje empiece a subir. Con estas condiciones se reducen significativamente las pérdidas por conmutación en los dispositivos de potencia,

En la figura 2.8 se muestra un comparativo entre las pérdidas que se generan con la conmutación suave y dura. Con esta última conmutación se genera mayor cantidad de pérdidas, mientras que con la conmutación suave se reducen significativamente.

Existen varios tipos de inversores y circuitos tanque resonante que se emplean de acuerdo a las necesidades a utilizar.

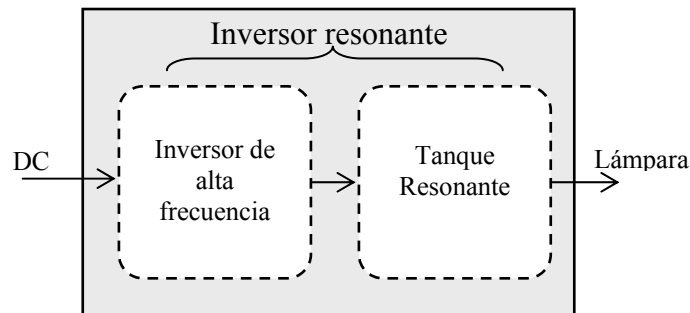


Figura 2.7 Etapas de un inversor resonante

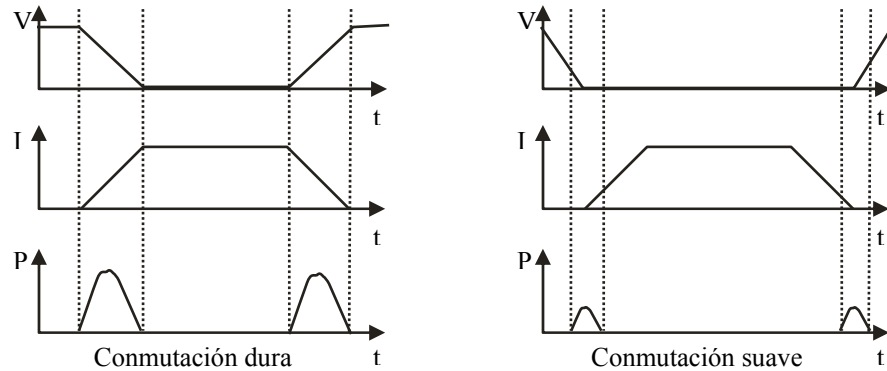


Figura 2.8 Comparativo de las pérdidas generadas por la conmutación dura y suave

2.3.1 Topologías básicas de inversores

Los criterios empleados para la clasificación de los inversores, utilizados en los balastos electrónicos para encender las lámparas de descarga dependen de tres factores principalmente [22] [16] :

- *Señal de entrada:* En función de las características de la señal de entrada los inversores se clasifican en: alimentados en tensión o alimentados en corriente. Si la fuente de entrada tiene un comportamiento equivalente al de una fuente de tensión ideal se dice que el inversor está alimentado en tensión. En cambio si la fuente de entrada se puede aproximar mediante una fuente de corriente se dice que el inversor está alimentado en corriente. Las características eléctricas y la configuración entre estos dos tipos de inversores varían notablemente.
- *Señal de salida:* pueden ser monofásicos o trifásicos. En general la clase de inversores utilizados en balastos electrónicos son monofásicos y la señal que se le aplica a la lámpara debe ser alterna y periódica. La topología del inversor depende de las dos clasificaciones anteriores,
- *Potencia en la carga:* Pus-Pull, Medio puente, Puente completo, Amplificador Clase D y Amplificador clase E.

En los siguientes apartados se describe el funcionamiento de las cinco topologías básicas de inversores.

2.3.1.1 Inversor Push-Pull

El inversor Push-pull en una topología alimentada en tensión (figura 2.9), que emplea dos interruptores y un transformador que tiene una relación unitaria. Estos interruptores se hacen conmutar empleando señales de compuerta complementarias. De este modo, con S_1 cerrado, se aplica una tensión en el semidevanado inferior del primario del transformador que induce una tensión de salida positiva V_{AB} . Cuando se abre S_1 y se cierra S_2 la situación se invierte, quedando aplicada tensión en el semidevanado superior que induce una tensión de salida negativa. Mientras S_2 permanece cerrada el transistor S_1 soporta el doble de la tensión de entrada E debido a que se suman las tensiones de los dos semidevanados de primario.

Las características de un inversor en push-pull se pueden resumir en los siguientes puntos:

- *La señal de salida:* la señal de salida de un inversor push-pull es una señal cuadrada.
- *La amplitud de salida no es controlable:* la tensión de salida es proporcional a la tensión de alimentación.
- Frecuencia de salida variable.
- La tensión máxima que soportan los interruptores es el doble de la tensión de alimentación.
- Las señales de compuerta de ambos interruptores están referenciadas a un mismo punto. Esta característica simplifica la implementación del circuito de oscilador.

La señal que se le aplica al tanque resonante es una señal bipolar, y el voltaje máximo aplicado a la carga es igual al de la entrada, la ventaja que presenta es que los dos interruptores están aterrizados y en este caso que el transformador tenga una relación unitaria. El transformador sirve como acoplamiento y permite regular el voltaje que se le aplica a la lámpara.

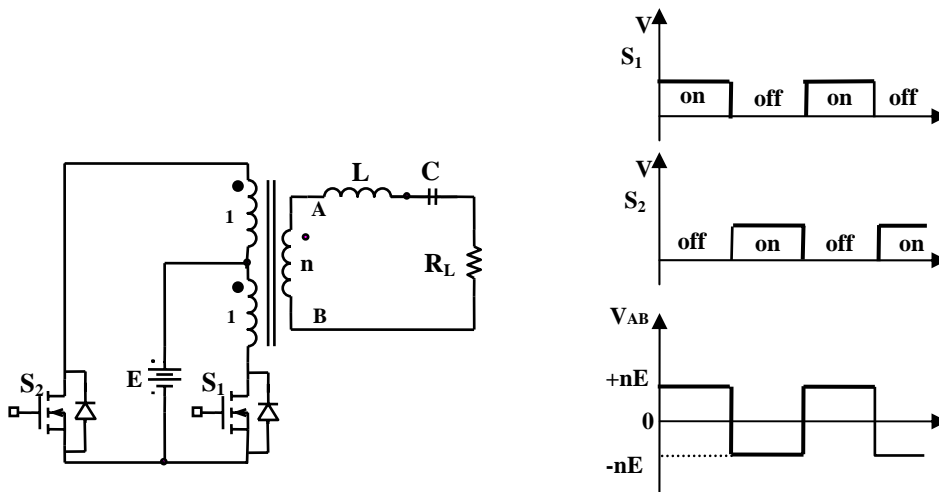


Figura 2.9 Circuito esquemático de un inversor Push-Pull

2.3.1.2 Inversor Medio puente

El inversor medio puente es una topología alimentada en tensión (figura 2.10), su configuración se compone de dos fuentes de igual magnitud en serie o una fuente con un divisor capacitivo como el mostrado en la figura 2.10 para obtener dos fuentes en serie, también se utilizan dos interruptores. El modo de funcionamiento consiste en hacer conmutar los interruptores S_1 y S_2 con señales de control complementarias de forma que cada uno esté cerrado la mitad de un periodo. De este modo se obtiene una onda cuadrada de salida de amplitud $E/2$ y sin componente de continua. Para conseguir aislamiento entre la entrada y la salida en un inversor en medio puente se acopla la carga a través de un tanque resonante.

Las características de un inversor en medio puente se presentan en los siguientes puntos:

- *La señal de salida:* es una señal cuadrada, por lo que el contenido armónico es muy elevado y el filtrado es complejo.
- *La amplitud de salida:* en un medio puente se obtiene una onda cuadrada cuya amplitud es igual a la tensión de alimentación. El único procedimiento para variar la amplitud de salida es mediante un convertidor previo que permita modificar la tensión de entrada al inversor.
- *Frecuencia de salida:* en un inversor en medio puente la frecuencia de salida es igual a la de conmutación de los interruptores.
- La tensión que soportan los interruptores es el doble de la amplitud de la señal cuadrada de salida.

Esta topología presenta las siguientes desventajas:

- Necesita de dos capacitores de filtrado
- Uno de sus interruptores no está aterrizado.
- Utiliza dos interruptores de potencia.

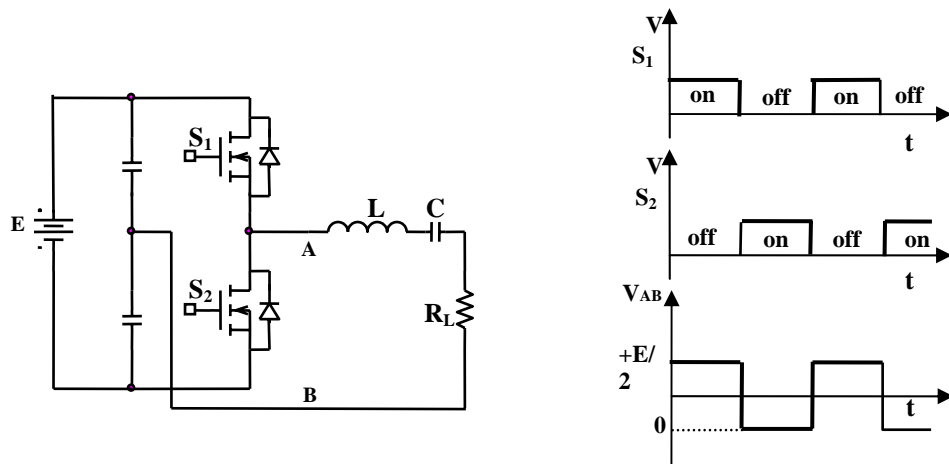


Figura 2.10 Circuito esquemático de un inversor medio puente.

2.3.1.3 Amplificador Clase D

El amplificador clase D (figura 2.11) es similar en características al inversor medio puente, la diferencia radica en la señal que se le aplica al tanque resonante, es una señal unipolar y su valor máximo es el voltaje de entrada, por lo que tiene una componente de cd que se elimina colocando un capacitor en serie en el punto A, con esto el valor de voltaje máximo de la señal cuadrada de la salida equivale la mitad de la entrada.

2.3.1.4 Inversor puente completo

El inversor puente completo, al igual que todos los inversores anteriores, es una topología alimentada en tensión (figura 2.12) y posee cuatro interruptores, este tipo de inversor se emplea para potencias mayores, se hace conmutar alternativamente los interruptores de cada diagonal. Es decir, la mitad de un periodo permanecen cerrados (S_1 y S_4) y la otra mitad (S_2 y S_3). De esta forma se obtiene una señal de salida cuadrada de amplitud E , tal como se muestra en la figura 2.12. La principal diferencia respecto al medio puente es que, a igual esfuerzo de tensión en los semiconductores, se obtiene el doble de amplitud de la tensión de salida por lo que se duplica la capacidad de manejar potencia.

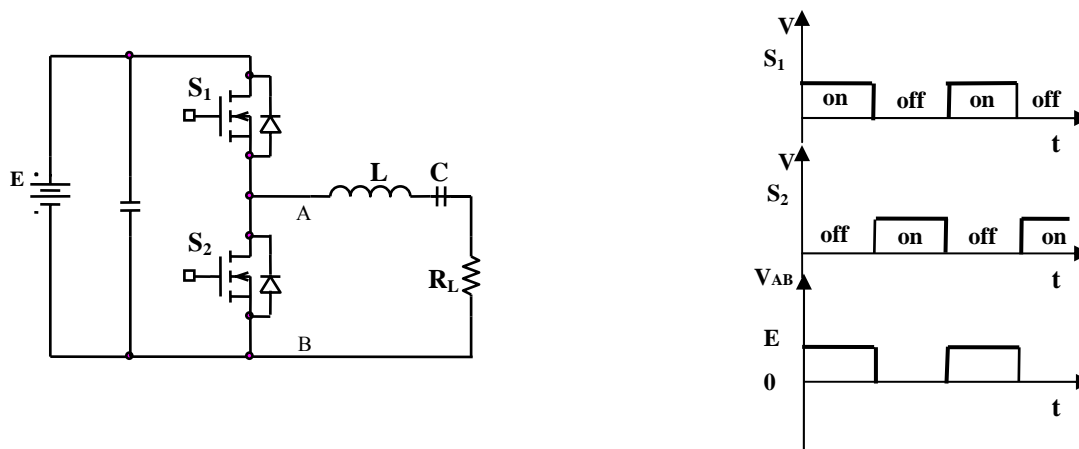


Figura 2.11 Circuito esquemático de un amplificador Clase D.

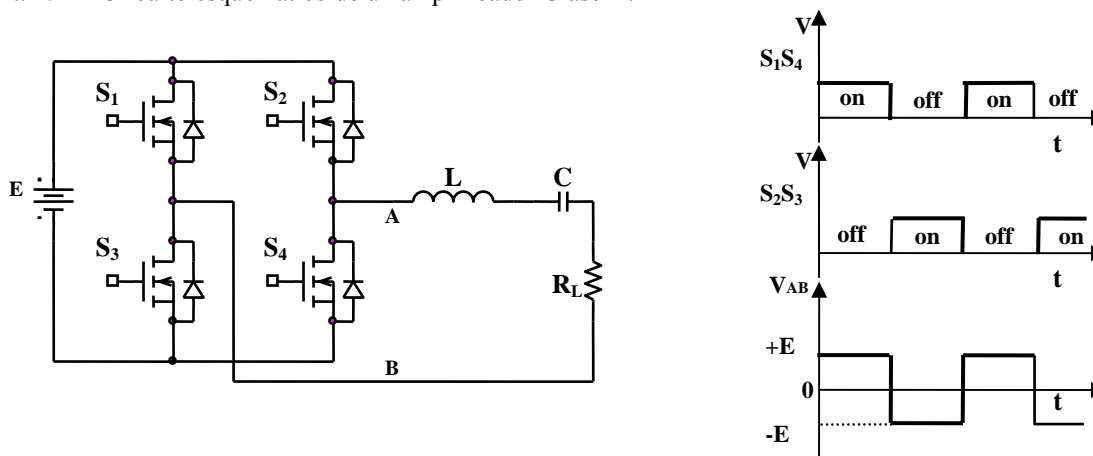


Figura 2.12 Circuito esquemático de un inversor puente completo.

2.3.1.5 Amplificador clase E conmutado a voltaje cero

El ACECVC fue desarrollado y patentado por Nathan y Sokal en 1975 [9], su circuito básico consta de un dispositivo semiconductor de potencia funcionando como interruptor (abierto-cerrado), un capacitor C_s , un inductor en serie con la fuente de voltaje y un circuito LC serie como carga (figura 2.13). Idealmente el ACECVC no tiene pérdidas de potencia, sin embargo presenta pérdidas debido a la conmutación del dispositivo, en los elementos reactivos y en el circuito oscilador-impulsor. El funcionamiento del circuito lo determina la señal de compuerta aplicada al dispositivo de potencia, el ciclo de trabajo debe ser del 50% para desarrollar la máxima potencia de salida, idealmente no existe traslape en las formas de onda de corriente y voltaje por lo que la potencia en el interruptor es cero, sin embargo en la práctica el interruptor tiene una resistencia de encendido finita y las transiciones de encendido y apagado no son despreciables por lo que reduce la eficiencia máxima, además de una capacitancia parásita que limita la frecuencia de operación [9].

Las características de un ACECVC se presentan en los siguientes puntos:

- Estructura sencilla.
- Eficiencia teórica del 100%
- Conmutaciones a voltaje cero.
- Altas frecuencia de funcionamiento.
- La salida sinusoidal.

Las principales desventajas que presentan son: los esfuerzos de voltaje y corriente en el interruptor y que trabaja a potencias bajas y medias. En la figura 2.13 se muestran las señales típicas de voltaje y corriente del (ACECVC) en conmutación óptima y sub-óptima. La diferencia radica en que durante la conmutación sub-óptima se activa el diodo interno del dispositivo de potencia [18] [9].

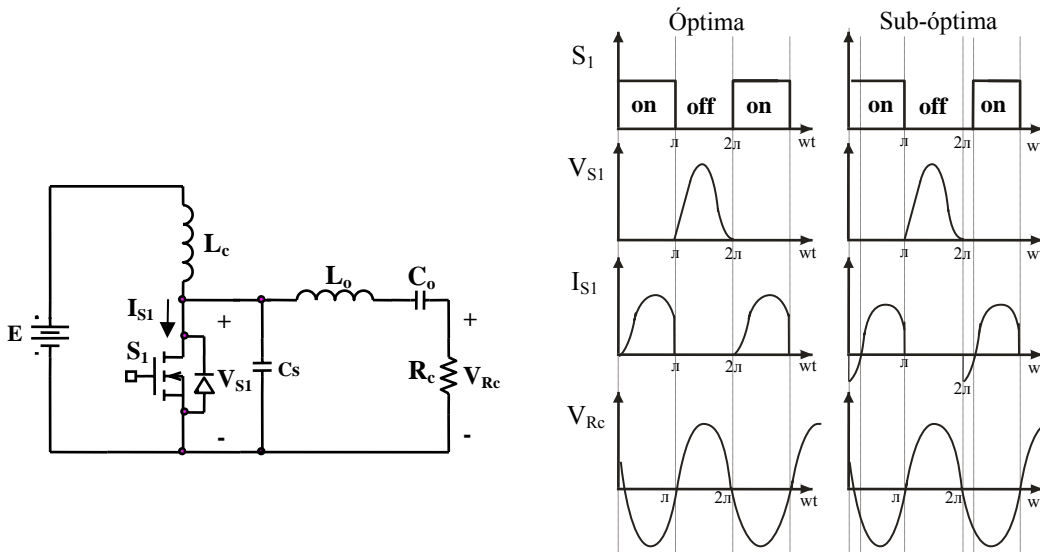


Figura 2.13 Circuito esquemático de un inversor clase E

2.3.2 Selección de la topología inversora

En la tabla 2.2 se muestra una comparación de las topologías anteriores de inversores.

Tabla 2.2 Comparativa de las topologías empleadas en balastros electrónicos

Inversor	Ventajas	Desventajas
Clase E	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza un solo interruptor • Función en alta frecuencia • La salida sinusoidal • Conmutación a Voltaje Cero • Eficiencia teórica del 100 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene esfuerzos de voltaje y corriente altos
Clase D	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento sencillo • Función en alta frecuencia • Un capacitor de filtrado 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza dos interruptores • Un interruptor flotado • Dificultad conmutación suave
Medio puente	<ul style="list-style-type: none"> • Función en alta frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza dos interruptores • Un interruptor flotado • Utiliza 2 capacitores
Push-pull	<ul style="list-style-type: none"> • Función en alta frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza un transformador • Utiliza dos interruptores
Puente completo	<ul style="list-style-type: none"> • Función en alta frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza cuatro interruptores

Considerando las características de la tabla 2.2, el ACECVC es un inversor atractivo para el diseño del balastro electrónico por su tamaño, por la cantidad de los elementos que lo constituyen y por sus altas densidades de potencia. Pero tiene una desventaja que en su forma básica no es útil para encender una lámpara fluorescente ya que como se mencionó en la sección 1.4.4.2 la lámpara tiene un comportamiento resistivo, cuando está apagada se comporta como resistencia muy elevada, y cuando esta encendida se comporta como una resistencia pequeña finita, por lo que se tiene que buscar el tanque resonante adecuado que proporcione el buen funcionamiento de la lámpara de descarga.

Considerando esto último, el balastro electrónico se ve obligado a trabajar en 2 estados:

- *Estado de preencendido:* la función principal del balastro es proporcionar el voltaje de encendido adecuado para encender la lámpara. Su duración es de fracciones de segundo y se caracteriza por la ausencia de carga. Bajo este estado la lámpara se encuentra apagada y se comporta como un circuito abierto o una resistencia muy grande.
- *Estado estable:* en este estado la función principal del balastro es limitar la corriente en la lámpara fluorescente, asimismo, en este estado la lámpara también se comporta como una resistencia cuyo valor depende de la corriente que fluye a través de ella.

A continuación se estudia el tanque resonante que proporciona las características para el encendido de la lámpara fluorescente.

2.3.3 Tanque Resonante

El tanque resonante es una combinación de elementos R, L y C, su función es proporcionar los niveles de voltaje y corriente adecuados para que la lámpara funcione correctamente, el cual trabajará a una frecuencia de resonancia o cercana a ella. Cabe resaltar que la impedancia que presenta un tanque resonante depende de la frecuencia a la cual trabaja y de su configuración, a continuación se muestran las estructuras básicas de un tanque resonante serie y paralelo.

En la figura 2.14 se muestra un tanque resonante serie, dado que la inductancia es directamente proporcional a la frecuencia y la capacitancia es inversamente proporcional a la misma, al aumentar la frecuencia el inductor aumenta y el capacitor disminuye. Sin embargo, existe cierta frecuencia en donde los valores de las reactancias X_C y X_L son iguales y se anulan por ser complementarias. Por lo cual la impedancia vista por la fuente es el valor de la resistencia y la frecuencia de resonancia está dada por la siguiente ecuación:

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

El factor de calidad en un circuito RLC serie esta dado por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\omega_s L}{R} \quad (2.2)$$

En el caso de un tanque resonante en paralelo (figura 2.15) a esa frecuencia la intensidad que circula por el capacitor es igual a la que circula por la bobina, pero opuesta (desfasada 180°), por lo que ambas se anulan dando la impresión de que la corriente que circula es la que pasa a través de la resistencia.

El factor de calidad en un circuito RLC paralelo esta dado por la ecuación:

$$Q = \frac{R}{\omega_s L} \quad (2.3)$$

Dado el comportamiento de la lámpara, se requiere una serie de características que debe tener el tanque resonante para encender la lámpara fluorescente.

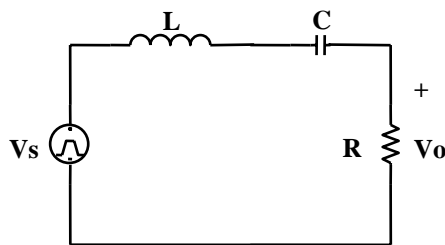


Figura 2.14 Tanque Resonante LCR serie.

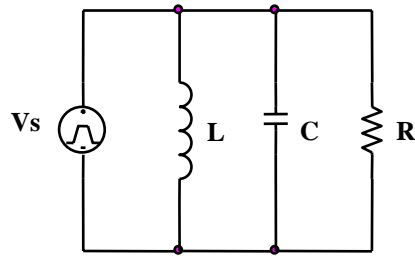


Figura 2.15 Tanque resonante LCR paralelo

2.3.3.1 Características del tanque resonante

Los criterios base para este análisis son los que impone la lámpara fluorescente. Estos requisitos señalan que la función del tanque resonante debe ser:

- a) Proporcionar el voltaje de encendido adecuado.
- b) Limitar la corriente de descarga de la lámpara fluorescente.
- c) Proporcionar una señal alterna y simétrica.

2.3.3.1.1 Combinaciones de los elementos del tanque resonante

En la figura 2.16 se muestran las posibles combinaciones que pueden adoptar los elementos del tanque resonante. En esta figura cada cuadro puede ser un elemento inductivo, capacitivo o combinaciones de ambos.

En lo que respecta a las lámparas de arranque instantáneo, hay que considerar cual de todas estas combinaciones es la más apropiada para su manejo.

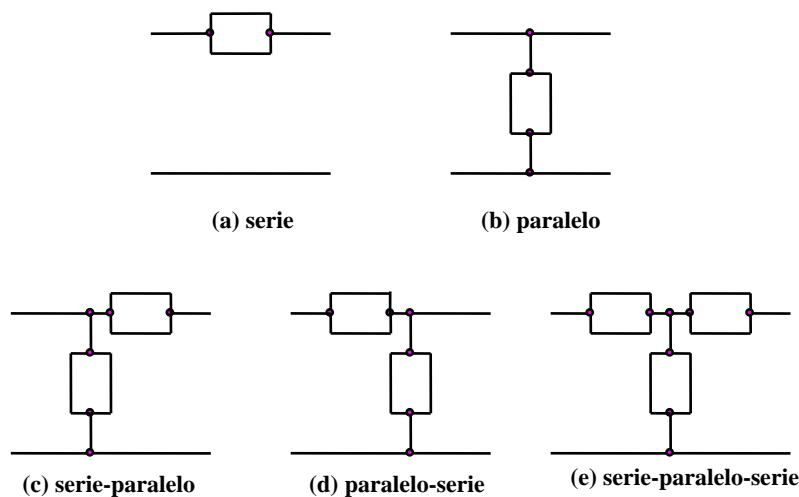


Figura 2.16 Combinaciones del tanque resonante entre la señal de entrada y la carga.

2.3.3.1.2 Análisis de las distintas combinaciones

El arreglo de la figura 2.16(a) cumple con el requisito del inciso (b) ya que la impedancia del tanque resonante puede limitar la corriente de descarga de la lámpara fluorescente. Pero de ninguna manera podrá elevar el voltaje de alimentación del tanque. En consecuencia, el encendido de la lámpara no es posible pues está limitado al voltaje de alimentación.

Por otro lado, en el arreglo de la figura 2.16(b) no es posible elevar el voltaje ya que el tanque resonante está en paralelo tanto con la carga como con la fuente de alimentación, por lo que el voltaje que tiene es el mismo, además no proporciona ningún medio para limitar la corriente de descarga.

En el arreglo de la figura 2.16(c) es posible limitar la corriente de descarga, sin embargo, durante el encendido la lámpara se comporta como un circuito abierto, el cual impide la circulación de una corriente resonante que proporciona el voltaje de encendido adecuado en la lámpara, lo cual regresa al caso anterior, debido a que la impedancia del tanque resonante que limita la corriente de descarga se encuentra en serie con la carga que en este caso en particular es la lámpara.

En el arreglo de la figura 2.16(d) si se cumplen todos los requisitos. Una de las impedancias limita la corriente de descarga y la otra proporciona el voltaje de encendido, sin embargo, para realizar ambas funciones esta configuración necesita de frecuencias diferentes para cada función. El cual requiere de una frecuencia para el encendido y otra para el estado estable de la lámpara.

De la misma manera que el arreglo anterior, el arreglo de la figura 2.16(e) cumple los requisitos fijados por las lámparas fluorescentes de arranque instantáneo. Pero a diferencia del anterior, presenta una impedancia extra en serie con la carga para limitar la corriente de descarga. Esta impedancia extra permite que el cambio de impedancias que se presenta al encender la lámpara no afecte al funcionamiento del tanque resonante. En otras palabras es posible prender y mantener encendida la lámpara con una sola frecuencia de operación.

En resumen, los arreglos que resultan más apropiados para el manejo de lámparas fluorescentes son los de la figura 2.16d y 2.16e, siendo este último el más completo.

2.3.3.2 Selección del tanque resonante

Para restringir el número de combinaciones se imponen dos limitaciones más a las propias de las lámparas fluorescentes. Las condiciones son las siguientes: sencillez de construcción y un mínimo de elementos inductivos. Estas condiciones permiten simplificar la estructura, reducir peso, volumen y costo, al permitir un mínimo de inductancias. En el análisis anterior se derivaron tres tipos de tanques resonantes que son:

- Tanque resonante LC paralelo.
- Tanque resonante LCC paralelo.
- Tanque resonante LCC serie.

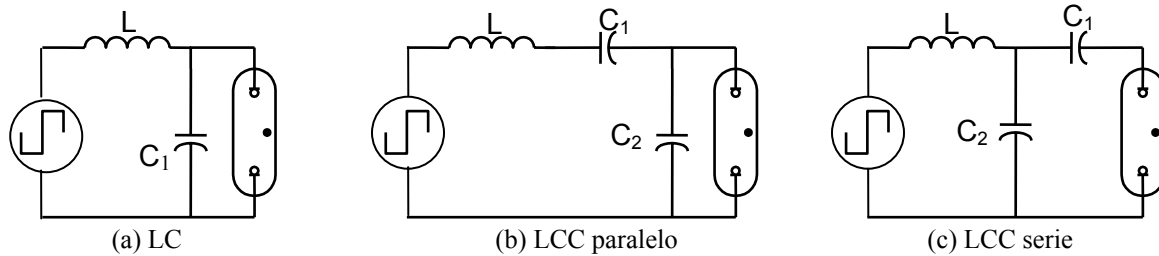


Figura 2.17 Tanques resonantes para lámparas de arranque instantáneo.

En la figura 2.17 se muestra la configuración de estos tres tanques resonantes para encender lámparas fluorescentes.

A continuación se presenta el análisis de estos tanques resonantes, empleados en balastos electrónicos; para ello, en el capítulo anterior se mencionó, que al trabajar a altas frecuencias la lámpara se comporta como una resistencia. Por lo que la resistencia R_L que aparece en los circuitos tanques resonantes representa a la lámpara fluorescente.

2.3.3.2.1 Tanque resonante LC paralelo (LCP)

En la figura 2.18 se muestra la configuración de un tanque resonante LCP. Este circuito tiene como equivalente el tanque resonante LC serie que se muestra en la figura 2.19. Las ecuaciones que relacionan al tanque LCP con el tanque LC serie están dadas por las siguientes ecuaciones: la ecuación 2.4 representa la parte real y la parte imaginaria esta dada por la ecuación 2.5.

$$\text{Re} = \frac{R_L X C^2}{R_L^2 + X C^2} \quad (2.4)$$

$$X C e = \frac{R_L^2 X C}{R_L^2 + X C^2} \quad (2.5)$$

El circuito equivalente durante el pre-encendido se muestra en la siguiente figura 2.20, así como la ganancia de voltaje.

$$G = \frac{V_{enc}}{V_s} = \frac{X C}{\sqrt{R_p^2 + (X L - X C)^2}} \quad (2.6)$$

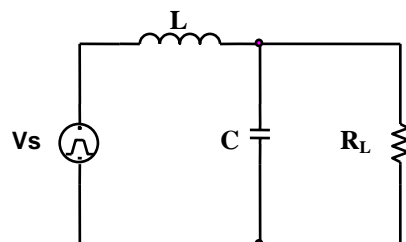


Figura 2.18 Tanque resonante LC paralelo.

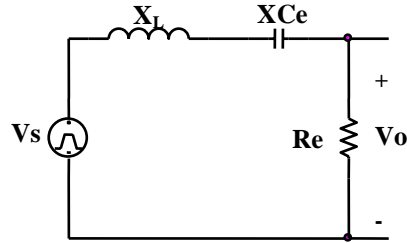


Figura 2.19 Circuito equivalente

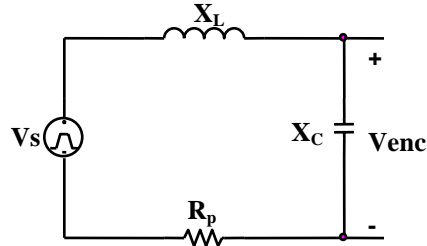


Figura 2.20 Circuito equivalente durante el pre-encendido LCP

2.3.3.2.2 Tanque resonante LCC paralelo (LCCP)

En el tanque resonante LCC paralelo el capacitor está colocado en serie con la bobina resonante, la ventaja de colocarlo así es que filtra mejor la componente de CD de la señal de entrada, sobre todo la que proporciona una señal unipolar al tanque resonante. Otra de las ventajas es que entrega la potencia a la lámpara, pero la desventaja es que el circuito no puede ser alimentado con tensiones bajas, por lo cual el voltaje debe de ser mayor o igual al voltaje que se le suministra a la lámpara. En la figura 2.21 se muestra la configuración del tanque (LCCP).

El tanque LCCP también tiene un circuito serie equivalente (figura 2.22) el cual esta dado por las siguientes ecuaciones:

$$Re = \frac{R_L X C_2^2}{R_L^2 + X C_2^2} \tag{2.7}$$

la parte imaginaria está dada por la ecuación 2.8:

$$XCe = \frac{R_L X C_2^2}{R_L^2 + X C_2^2} + X C_1 \tag{2.8}$$

El circuito equivalente durante el pre-encendido se muestra en la figura 2.23, así como la ganancia de voltaje del mismo.

$$G = \frac{V_{enc}}{V_s} = \frac{X C_2}{\sqrt{R_p^2 + (X L - X C_1 - X C_2)^2}} \tag{2.9}$$

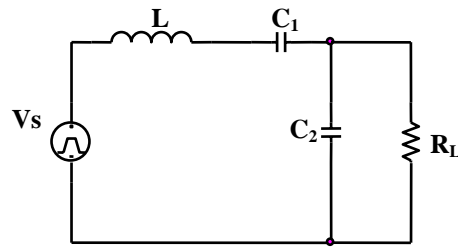


Figura 2.21 Tanque resonante LCCP

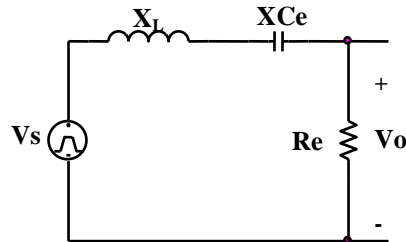


Figura 2.22 Circuito serie equivalente

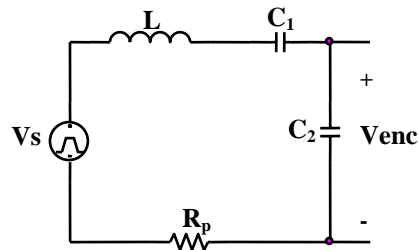


Figura 2.23 Circuito equivalente durante el pre-encendido LCCP

2.3.3.2.3 Tanque resonante LCC serie (LCCS)

En el tanque resonante LCC serie se coloca un capacitor en serie con la lámpara, la ventaja de este circuito es que puede ser alimentado con tensiones bajas, la desventaja es que no es útil para encender lámparas de arranque rápido, debido a que requiere de un precalentamiento en los electrodos. En la figura 2.25 se muestra la configuración del tanque (LCCS).

Al igual que los circuitos anteriores, el tanque LCCS tiene un circuito serie equivalente (figura 2.26) cuyos elementos están representados por las ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$R_e = \frac{R_L X_{C2}^2}{R_L^2 + (X_{C2} + X_{C3})^2} \quad (2.10)$$

$$X_{C_e} = \frac{X_{C2} [R_L^2 + X_{C3} (X_{C2} + X_{C3})]}{R_L^2 + (X_{C3} + X_{C2})^2} \quad (2.11)$$

El circuito equivalente durante el preencendido se muestra en la figura 2.27, así como la ganancia de voltaje del mismo.

$$G = \frac{V_{enc}}{V_s} = \frac{XC_2}{\sqrt{R_p^2 + (XL - XC_2)^2}} \tag{2.12}$$

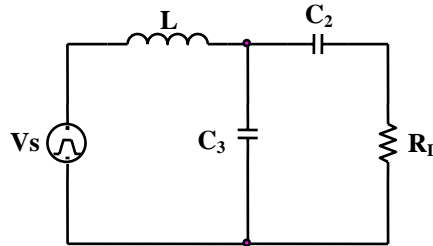


Figura 2.24 Tanque resonante LCCS

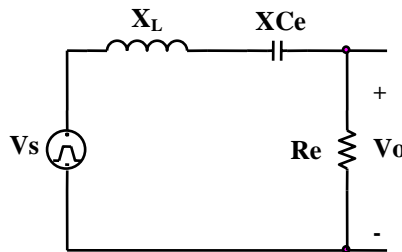


Figura 2.25 Circuito serie equivalente

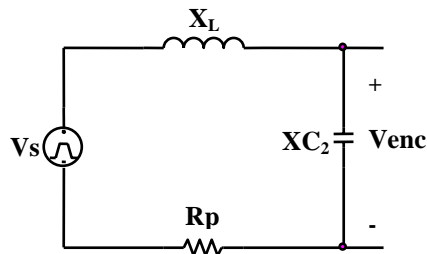


Figura 2.26 Circuito equivalente durante el preencendido LCCS

De las tres configuraciones analizadas, la menos adecuada para la aplicación es el tanque LC paralelo, ya que no es posible sintonizarlo para que entregue la potencia requerida por la lámpara, además de que entrega un voltaje de encendido elevado. De los tanques restantes el mas apropiado es el tanque LCC serie, debido a que la estabilización de la corriente de descarga la realiza la bobina resonante y el voltaje de encendido lo proporciona un capacitor, además de que es posible alimentar al tanque resonante con bajas tensiones.

3. Análisis y Diseño del balastro electrónico

En este capítulo se analiza cada una de las etapas del balastro electrónico. Además se sigue un procedimiento de diseño para calcular todos los elementos del circuito, siendo necesario la implementación de un programa de cómputo para agilizar el cálculo de los mismos.

3.1 Introducción

Para el análisis del balastro electrónico se consideran aspectos importantes como la potencia y la resistencia interna de la lámpara fluorescente. La relación de inductancias, el factor de calidad, el ciclo de trabajo y los elementos parásitos del interruptor son importantes en el análisis del ACECVC, cabe mencionar que este análisis se desarrolla con base en la referencia [9], sin embargo es el punto de partida del proyecto que se presenta. Así como las impedancias que resultan del acoplo del tanque resonante con el ACECVC y el circuito oscilador-impulsor.

3.2 Análisis del balastro electrónico

Para el análisis del balastro electrónico se contemplan las siguientes etapas: especificaciones de la lámpara fluorescente, el circuito oscilador-impulsor formado por un temporizador LMC555 y un controlador de compuerta IR2110, el ACECVC acoplado con el tanque resonante LCC serie. En la figura 3.1 se muestra el diagrama a bloques de las etapas del balastro electrónico

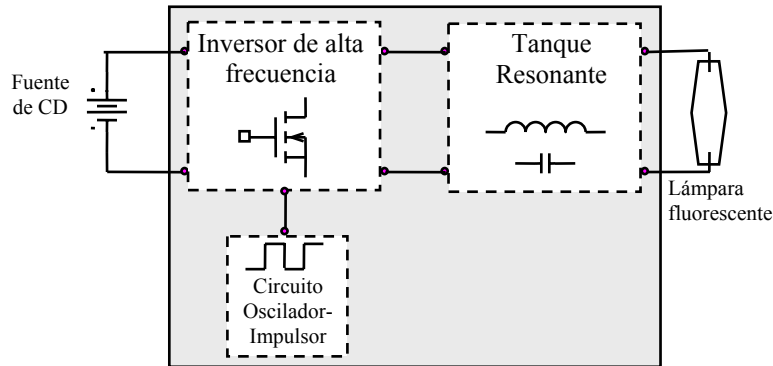


Figura 3.1 Diagrama a bloques del balastro electrónico

Considerando lo anterior se inicia el análisis de cada etapa del balastro para obtener los valores de diseño para construirlo.

3.2.1 Especificaciones de la lámpara fluorescentes

En la figura 3.2 se muestran las principales características de la lámpara fluorescente de arranque instantáneo que se quiere encender. Dentro las cuales se mencionan: el tipo de luz, la longitud, diámetro de la lámpara, forma y la potencia nominal [4] [URL10] .

Además de las especificaciones anteriores hay otras que se deben considerar para el diseño del balastro electrónico como la corriente RMS que circula por la lámpara. El dato mas importante para el diseño del balastro es la potencia nominal de la lámpara y la corriente que circula por ella, las cuales se describen a continuación:

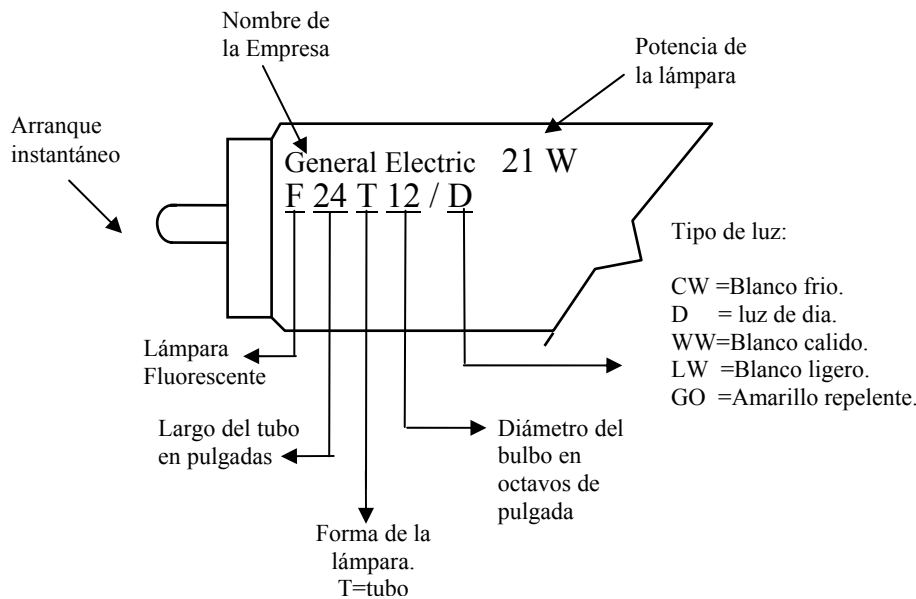


Figura 3.2 Lectura de los símbolos en la lámpara

- *Potencia de la lámpara:* la potencia de la lámpara propuesta para el diseño del balastro es de 21 W.
- *El cálculo de la resistencia interna equivalente de la lámpara:* es necesario conocer la potencia de la lámpara y la corriente de la misma, La potencia está indicada en la lámpara fluorescente. En el caso de la corriente, se utilizó el valor medido en la lámpara cuando ésta es alimentada por un balastro electromagnético, cuyo valor fue de 0.4 A.

El cálculo de la resistencia interna equivalente de la lámpara se determina con la ecuación 3.1:

$$R_L = \frac{P}{I^2} \quad (3.1)$$

donde:

- P es la potencia de la lámpara (=21 W), e
- I es la corriente máxima que circula por la lámpara.

Usando la ecuación anterior se obtiene el valor de la resistencia interna en la lámpara:

$$R_L = 131.2 \Omega.$$

- *Voltaje de encendido:* En la referencia [URL13] el voltaje de encendido para una lámpara de arranque instantáneo es alrededor de los 300-500 V, este valor depende de la longitud del tubo fluorescente.

3.2.2 Especificaciones del circuito oscilador-impulsor

Para controlar el encendido y apagado del dispositivo semiconductor de potencia (DSEP) se necesita una señal cuadrada con un ciclo de trabajo del 50%, para generar esta señal se utiliza el temporizador LCM555 en su modalidad CMOS, ya que se encuentran con facilidad y puede llegar a una frecuencia de oscilación máxima de 3 MHz [19]. Asimismo es necesario un impulsor de compuerta IR2110 para activar el dispositivo de potencia.

3.2.2.1 Circuito oscilador

El circuito integrado LMC555 tiene dos modos de operación, pero el modo utilizado es como multivibrador astable (oscilación libre), es decir que el voltaje de salida pasa de un estado alto a bajo repitiéndose el ciclo.

En la figura 3.3 se muestra la estructura básica de este oscilador en su modalidad astable [19] [3].

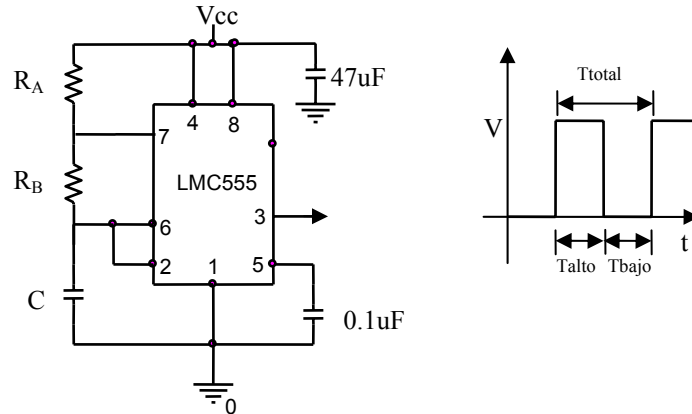


Figura 3.3 Circuito oscilador temporizador LMC555

El tiempo durante el cual la salida es alta esta dada por la ecuación (3.2).

$$t_{alto} = 0.695(R_A + R_B)C \quad (3.2)$$

y el tiempo durante la salida es baja se determina mediante la ecuación (3.3).

$$t_{bajo} = 0.695 R_B C \quad (3.3)$$

La frecuencia de oscilación esta dada por la ecuación 3.4:

$$f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (3.4)$$

además el ciclo de trabajo se calcula con la ecuación (3.3):

$$D = \frac{R_B}{(R_A + 2R_B)} * 100 \quad (3.5)$$

En las ecuaciones anteriores, el cálculo de la frecuencia y el ciclo de trabajo se hacen con base en las resistencias R_A , R_B y el capacitor C . Puesto que el ciclo de trabajo debe ser del 50% y la frecuencia de conmutación de 700kHz, con la ecuación 3.4 se supone la resistencia R_A (debe ser pequeña pero no cero) y el capacitor C para obtener el valor de R_B , sustituyendo estos valores en la ecuación 3.5 se comprueba que el ciclo de trabajo es muy cercano al 50%. Considerando las suposiciones en las ecuaciones anteriores, los valores faltantes se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores calculados para la oscilación del LMC555

Datos conocidos			Datos calculados		
Símbolo	Valor	Unidad	Símbolo	Valor	Unidad
f	700	kHz	R_B	6.75	k Ω
R_A	0.2	k Ω	Ciclo T.	49.2	%
C	150	pF			

3.2.2.2 Circuito impulsor

En cuanto al circuito impulsor, se utilizó el circuito integrado IR2110 [13] [12] que requiere de cierta amplitud de voltaje (10-20V) como señal de entrada, la cual debe suministrarse por el circuito oscilador. Además es necesario calcular el capacitor Bootstrap para obtener la señal de salida deseada, En la figura 3.4 se muestra el esquema del IR2110 que es un controlador de compuerta del MOSFET.

La función principal del IR2110 es generar una señal con los valores de voltaje y corriente adecuados para activar la compuerta del dispositivo de potencia.

Con la ecuación 3.6 se calcula el valor mínimo del capacitor bootstrap:

$$C = 15 \left[\frac{2 \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{is} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{CC} - V_f - V_{LS}} \right] \quad (3.6)$$

Para ello se tienen que consultar las hojas de especificaciones tanto del IR2110, el MOSFET de potencia utilizado (IRP450), el diodo de conmutación rápida (1N4937).

Los parámetros obtenidos de las hojas de especificaciones eléctricas de cada dispositivo [14] [5] [13] [12] se resumen en la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Parámetros para el cálculo del Bootstrap del IR2110

Cálculo del Bootstrap del IR2110			
Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Carga en la compuerta de DSP	Q_g	150	nC
Voltaje de alimentación	V_{cc}	15	V
Corriente por el lado alto del driver	$I_{qbs(max)}$	230	μA
Carga que requiere por ciclo	Q_{is}	5	nC
Corriente capacitor Bootstrap	$I_{Cbs(Leak)}$	50	μA
Frecuencia de conmutación	f	700	kHz
Voltaje de retroalimentación	V_f	1.2	V
Voltaje en el lado bajo del IR2110	V_{Ls}	0.1	V

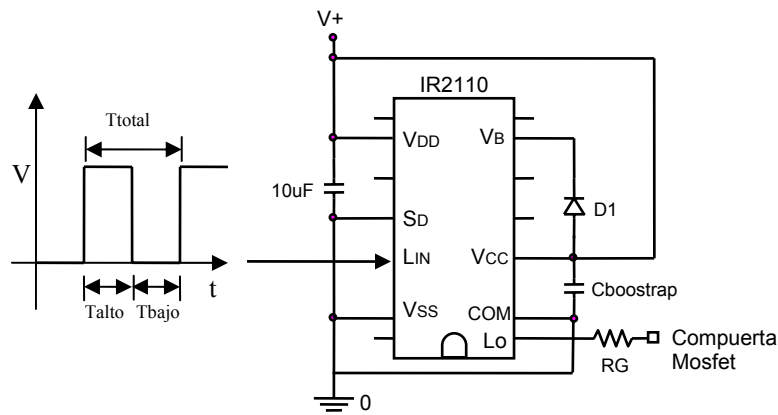


Figura 3.4 Circuito impulsor IR2110

3.2.3 Especificaciones del ACECVC y el tanque resonante

El diseño del ACECVC se hace con base en la referencia [9], en la cual se considera la resistencia de encendido del dispositivo ($R_{DS(ON)}$) y el capacitor parásito del salida (C_{oss}). El amplificador clase E cuenta dentro de su estructura básica con un tanque resonante LC serie, el cual no es adecuado para la aplicación de un balastro electrónico, por lo que se tuvo que acoplar con un tanque LCC serie que cumple con las características necesarias para poder encender una lámpara.

El acoplo se hace con base en las ecuaciones 2.10 y 2.11. Además se utilizan algunos elementos del ACECVC que sirven para encontrar los valores de los capacitores para armar el tanque resonante con los valores óptimos. Los cuales están en función de la resistencia interna de la lámpara (R_L), el capacitor (C_o), la frecuencia de conmutación (f_{sw}) y la resistencia R_c . En la figura 3.5 se muestra la estructura final del balastro electrónico, en donde se observa el acoplo del ACECVC y el tanque LCC serie.

Como se mencionó en el capítulo dos, todos los elementos del ACECVC están fuertemente relacionados entre si, y para empezar a realizar los cálculos es necesario obtener el voltaje de alimentación [18], para calcular este dato se utiliza la ecuación 3.7 en la cual se relaciona la potencia de salida (P_{sal}), la frecuencia de conmutación (f_{sw}) y un capacitor lineal C_s .

Sustituyendo el valor de la potencia nominal que es de 21 W, la frecuencia de conmutación de 700 kHz, y suponiendo el valor de C_s de 2.7 nF se obtiene el valor de la fuente de voltaje de entrada

$$V_{DC} = \sqrt{\frac{P_{sal}}{17.33 f_{sw} C_s}} \quad (3.7)$$

$$V_{DC} = 25.32 \text{ V}$$

Otro dato importante de esta etapa es el valor de la resistencia de carga (R_c), que se calcula con base en la ecuación 3.8, suponiendo una eficiencia teórica del 100% del ACECVC, lo cual significa que la potencia suministrada por la fuente de alimentación es igual a la potencia suministrada en la carga.

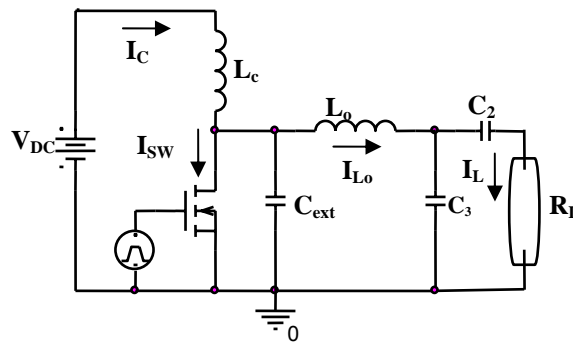


Figura 3.5 Esquema del Balastro Electrónico.

$$\eta = \frac{P_{ent}}{P_{sal}} = 100 \% \quad (3.8)$$

La potencia de entrada se expresa por la ecuación 3.9.

$$P_{ent} = V_{cc} I_{dc} \quad (3.9)$$

Pero como la eficiencia es del 100%, la potencia de salida se expresa por la ecuación 3.10:

$$P_{sal} = V_{cc} I_{dc} \quad (3.10)$$

La P_{sal} es una potencia disipada por la resistencia de carga R_c y se obtiene de la ecuación 3.11.

$$P_{sal} = \frac{V_o^2}{2R_c} \quad (3.11)$$

La amplitud del voltaje de salida se obtiene por la ecuación 3.12.

$$V_o = 1.074 V_{cc} \quad (3.12)$$

Sustituyendo el valor de la potencia y voltaje en la expresión (3.11), obtenemos el valor de R_c :

$$R_c = 17.6 \Omega$$

3.2.3.1 Selección del interruptor

En la figura 3.6 se muestra el dispositivo a utilizar como interruptor que es un MOSFET IRFP450 [14], la selección de este dispositivo se basa en su capacidad de trabajar a altas frecuencias, además de soportar altos esfuerzos de voltaje y corriente.

Este dispositivo tiene una resistencia de encendido $R_{DS(on)}$ pequeña para minimizar en lo posible las pérdidas. El valor de esta resistencia es de:

$$R_{DS(on)} = 0.4 \Omega$$

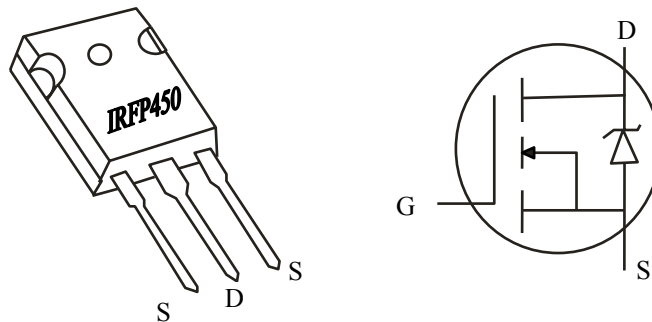


Figura 3.6 MOSFET y símbolo

Asimismo tiene una capacitancia parásita no lineal (C_{oss}) cuyo valor es el siguiente:

$$C_{oss} = 720 \text{ pF}$$

Es importante mencionar que el balastro electrónico además de esta capacitancia no lineal consta de un capacitor lineal externo puesto que estos están en paralelo la capacitancia total es la suma de estos dos capacitores (figura 3.7).

Por lo tanto C_1 se expresa en la ecuación 3.13:

$$C_1 = C_{oss} + C_{ext} \quad (3.13)$$

En la figura 3.8 se muestra la grafica derivada de la ecuación 3.7 donde el voltaje de alimentación, varía a medida que la capacitancia C_1 y la frecuencia de conmutación aumentan o disminuyen para obtener una potencia de 21 W.

Además, otras de las características importantes y que se debe tomar en cuenta de la capacitancia parasita del interruptor (C_{oss}) es que varía de forma no lineal con el voltaje drenaje-fuente.

Esta variación se puede apreciar en la gráfica de la Figura 3.9 [18] [14] .

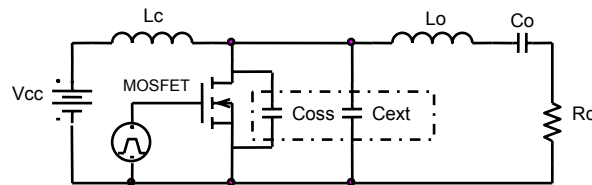


Figura 3.7 Circuito del ACE con la capacitancia que forma C_1

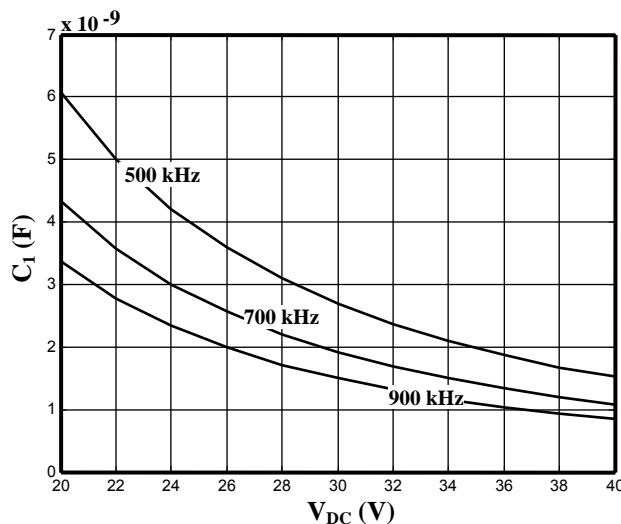


Figura 3.8 Grafica de la capacitancia C_1 contra el voltaje de alimentación

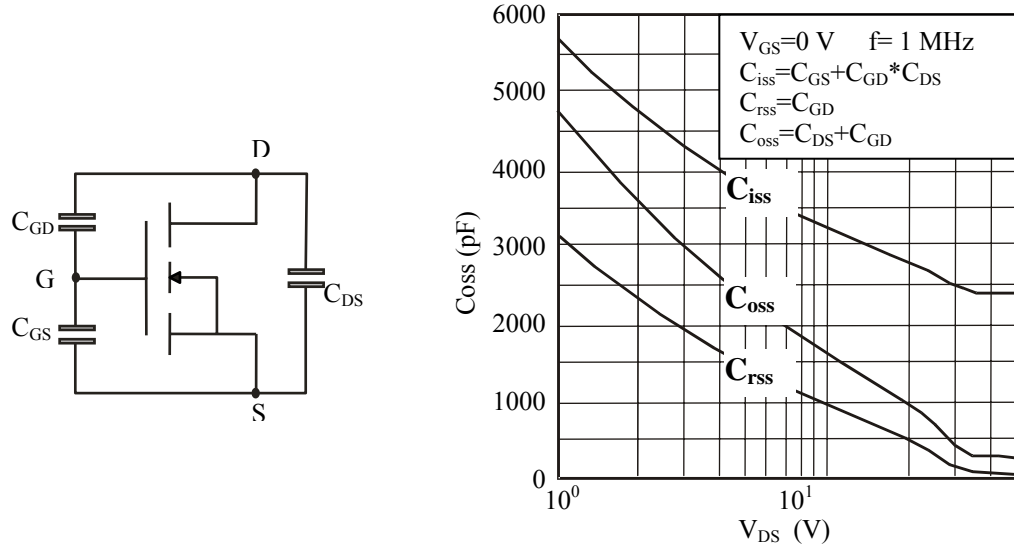


Figura 3.9 Gráfica de la capacitancia C_{oss} contra el voltaje drenaje fuente

3.2.3.2 Factor de calidad (Q) y relación de inductancias (H)

Otra de las especificaciones importantes es el factor de calidad, ya que entre mayor sea este valor la señal que se le suministre a la lámpara será más sinusoidal, el factor de calidad aceptable está en un rango de $2 < Q < 20$ [9] y se obtiene con la ecuación 3.14:

$$Q = \frac{\omega L_o}{R_c} \tag{3.14}$$

con esta ecuación se puede determinar el valor del inductor L_o del tanque resonante. Con la finalidad de que en la carga sea una señal senoidal, el valor seleccionado es:

$$Q = 10$$

La relación de inductancias (L_o/L_c) debe ser de un valor tal que el circuito funcione en modo continuo es decir que la corriente en el inductor (L_c) que esta en serie con la fuente no sea cero. Puesto que un valor elevado puede ocasionar una corriente cero [9] . Es necesario utilizar un valor pequeño de dicha relación. Para el desarrollo de este trabajo se utilizo el siguiente valor:

$$H = 0.1$$

3.3 Diseño del balastro electrónico

Para automatizar el diseño del balastro electrónico se implementó un programa en C++ Builder (Anexo A) en donde se calculan todos los elementos del circuito, también calcula algunas variables de interés necesarias para el diseño del mismo generando tablas donde se encuentran todos los parámetros calculados, de igual forma, el programa genera archivos que se usan para graficar las señales en algunos puntos específicos del circuito. También cuenta con una sección donde se diseñan los inductores con núcleos de ferrita y por último se muestra la vista final del balastro electrónico.

En la tabla 3.3 se muestran los parámetros iniciales que se introducen al programa para el cálculo de todos los elementos que forman al balastro electrónico, como los valores de corriente y voltaje, inductores, capacitores, circuito oscilador-impulsor. A continuación se muestra un ejemplo de diseño del balastro electrónico.

Tabla 3.3 Datos de entrada

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Frecuencia	F	700	kHz
Voltaje de alimentación	V_{DC}	25.32	V
Relación de inductancias	H	0.1	-----
Ciclo de trabajo	D	49.3	%
Factor de calidad	Q	10	-----
Resistencia de carga	R_L	131.2	Ω
Resistencia interna Interruptor	R_S	0.4	Ω
Capacitor interno del dispositivo	C_{OSS}	720	pF
Capacitor lineal propuesto	C_S	2.7	nF
Corriente máxima en la carga	I_m	0.4	A

Al ejecutar el programa se obtienen los parámetros de salida y algunos parámetros útiles en el diseño del balastro electrónico los cuales se muestran en las tablas 3.4 y 3.5 (Todos los valores de corriente y voltaje son valores máximos).

Tabla 3.4 Parámetros de salida

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Inductor choque	L_c	400	μH
Inductor del tanque resonante	L_o	40	μH
Capacitor del tanque resonante	C2	0.559	nF
Capacitor del tanque resonante	C3	0.937	nF
Capacitor externo	C_{ext}	1.61	nF
Corriente en el inductor L_c	I_{lc}	0.829	A
Corriente en el inductor L_o	I_{Lo}	1.545	A
Esfuerzo de corriente en el interruptor	I_{sw}	2.37	A
Esfuerzo de voltaje en el interruptor	V_{sw}	112.18	V
Potencia de entrada	P_{ent}	21.002	W
Potencia de salida	P_{sal}	21.002	W
Eficiencia (P_{ent}/P_{sal})	η	100	%

Tabla 3.5 Otros parámetros

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Capacitor Bosstrap	C_{bosst}	0.667	μF
Capacitor temporizador	C	150	pF
Resistencia R_A	R_B	200	Ω
Resistencia R_B	R_A	6.75	$k\Omega$
Corriente en la lámpara	I_{lamp}	0.566	A
Voltaje en la lámpara	V_{lamp}	74.25	V
Voltaje capacitor C_3	V_{C3}	237.42	V

3.3.1 Señales generadas por el programa de diseño

En la figura 3.10 se muestran las formas de onda generadas por el programa de diseño del balastro electrónico.

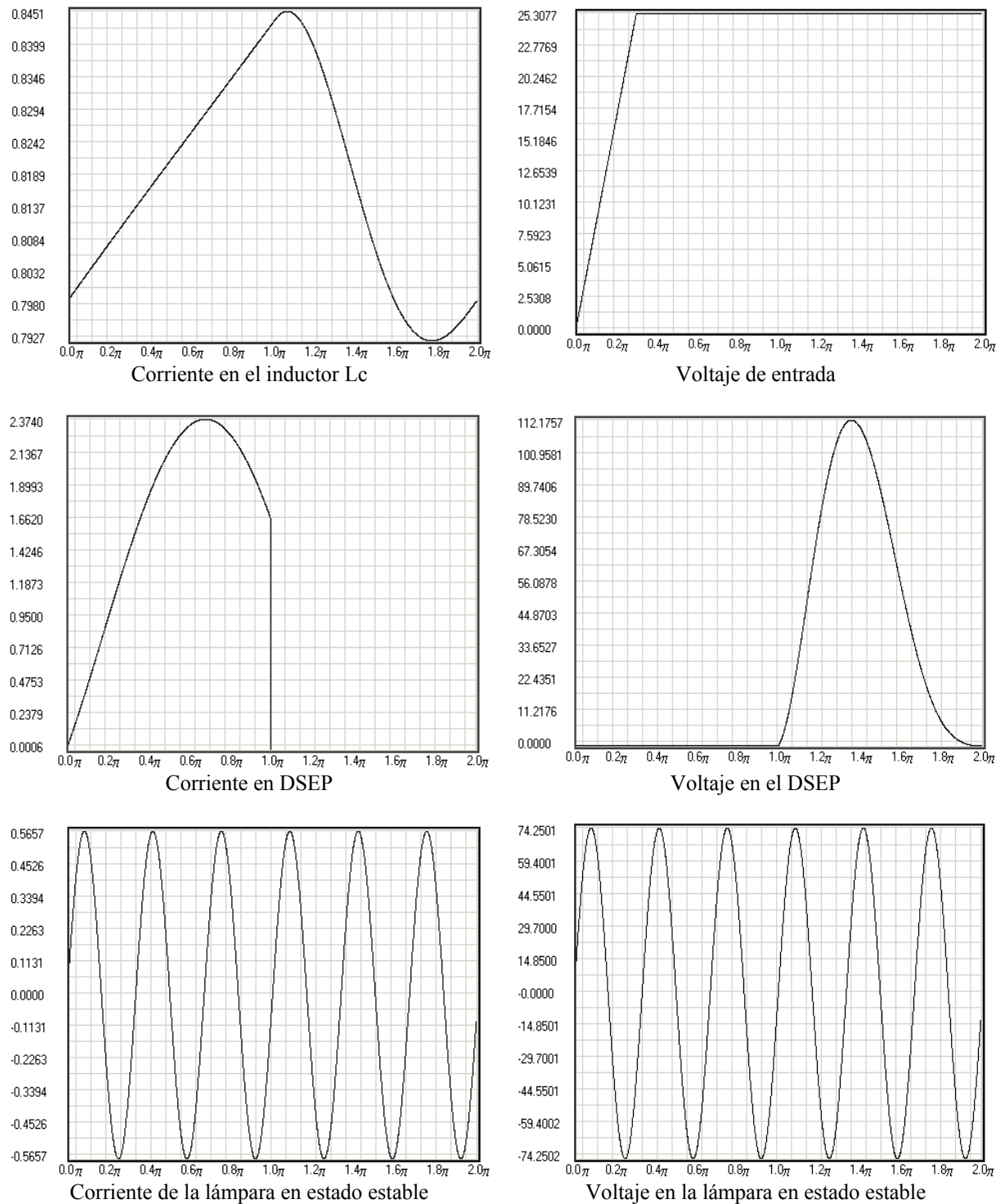


Figura 3.10 Señales del programa de diseño

3.4 Diseño de los inductores

Un inductor usualmente está constituido por un alambre conductor en forma de espiral típicamente de cobre. Existen inductores con núcleo de aire o con núcleo de ferrita, para incrementar su inductancia.

Una característica de los inductores es que se oponen a los cambios bruscos de la corriente que circula por ellos. Esto significa que cuando se pretende modificar la corriente que circula por el mismo, éste tratará de mantener su condición anterior.

Se pueden alimentar de dos formas: corriente directa y corriente alterna[URL15] .

- Si se aplica corriente directa (*CD*) a un inductor, éste se comporta como un corto circuito y deja pasar la corriente a través de él sin ninguna oposición. Por el contrario este presenta oposición al paso de la corriente en un instante de tiempo muy pequeño en el momento que se enciende la fuente de alimentación.
- En cambio si se aplica corriente alterna (*AC*) al inductor, éste se opone al flujo de corriente como una resistencia, pero a diferencia de ésta, se llama reactancia inductiva (X_L) cuyo cálculo se hace en base a la ecuación 3.15:

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.15)$$

Generalmente existen dos tipos de inductores: los de núcleo de aire y los de núcleo magnético (hierro o ferrita).

En la figura 3.11 se muestra un inductor con núcleo de aire, que presenta mejor estabilidad que los inductores con núcleo de ferrita ante variaciones de la intensidad de corriente, la temperatura y la frecuencia. Sin embargo, presentan ciertas desventajas como son: bajo factor de calidad, la dispersión de flujo por la ausencia de núcleo que concentre el flujo magnético, interferencia debido a la presencia de materiales conductores en sus proximidades, y pequeños valores de inductancias [URL14] .

Los núcleos de ferrita son fabricados mediante una mezcla de polvo de diferente material como óxido de hierro o carbonato entre otros, esto depende de la frecuencia a la que trabaje. La principal ventaja es su alta resistividad eléctrica, disminuyendo de esta manera las pérdidas por corrientes de Foucault⁴ y manteniendo un factor de calidad alto en altas frecuencias. En la figura 3.12 se muestran diferentes tipos de núcleos de ferrita [17] [7] .

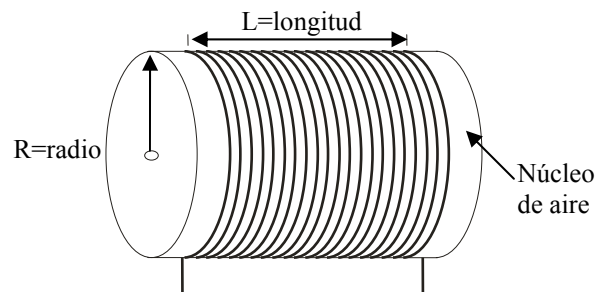


Figura 3.11 Inductor con núcleo de aire

⁴ Corrientes de Foucault: son corrientes inducidas en el conductor y presentando pérdidas por calentamiento

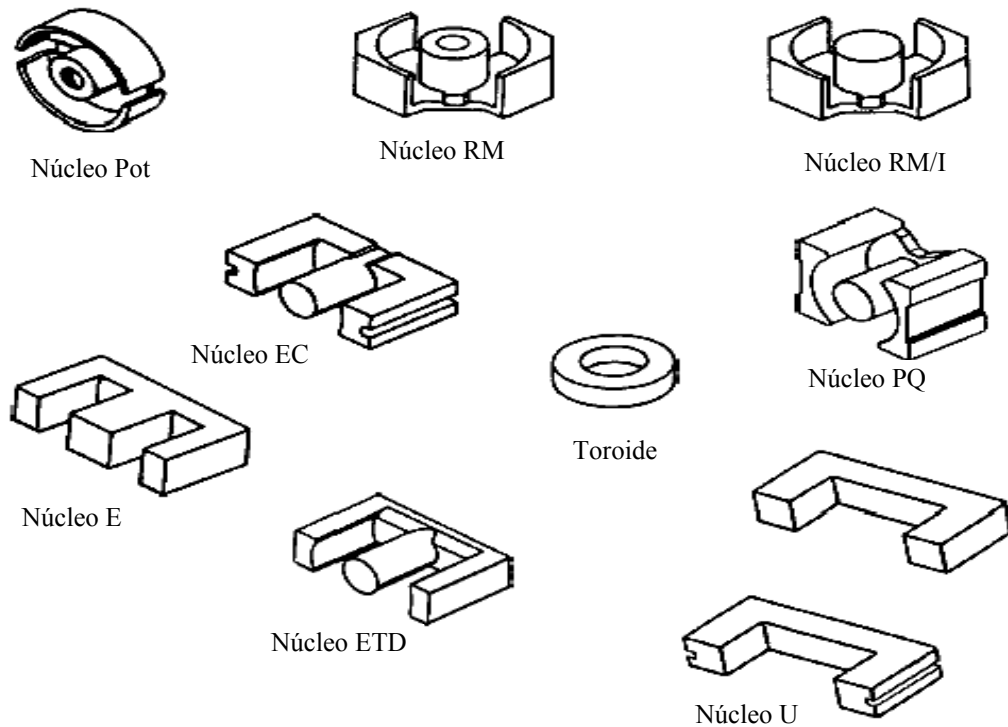


Figura 3.12 Tipos de núcleo de ferrita

En la tabla 3.6 se muestran otras ventajas y desventajas al usar los núcleos de ferrita que tiene la figura anterior[URL16] .

Tabla 3.6 Ventajas y desventajas del uso de núcleos de ferrita

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistividad • Amplio rango de frecuencias • Bajas pérdidas con alta permeabilidad • Alta estabilidad con el tiempo y la temperatura • Amplia selección de materiales • Gran variedad de formas de núcleos 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja conductividad térmica • Fragilidad y poca resistencia mecánica • Se saturan a bajas densidades de flujo

Por todo lo anterior se eligió trabajar con núcleos de ferrita para el diseño de los inductores, el tipo de núcleo escogido es un tipo RM/I [8] .

3.4.1 Especificaciones de un núcleo de ferrita RM

En la figura 3.13 se muestran las partes de un núcleo de ferrita RM y una vista de su sección transversal [URL16]

Para el diseño de los inductores con este tipo de núcleo, se considera aspectos como el material y la geometría del mismo.

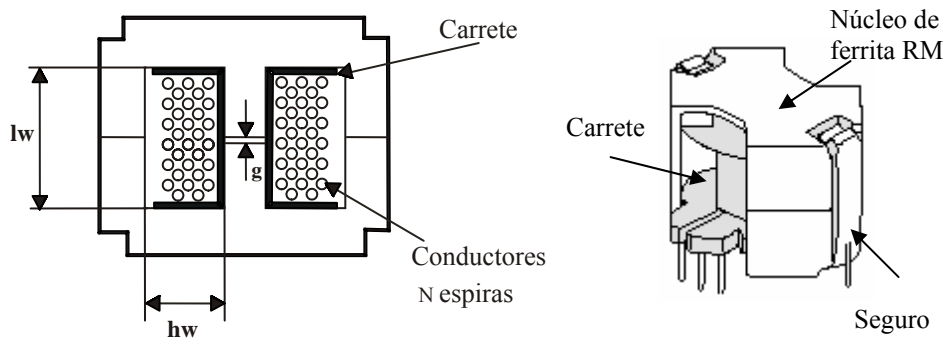


Figura 3.13 Núcleo RM y su sección transversal

A continuación se describe sus principales parámetros.

donde:

A_w Área de ventana ($A_w = l_w * h_w$).

A_e Sección media transversal del circuito magnético

K_{cu} Coeficiente del cobre (valores típicos comprendidos entre 0.6 y 0.8).

G Entrehierro (*Gap*) (cm).

J Densidad de corriente (350-450 A/cm²)

3.4.2 Especificaciones de diseño

Las bobinas se miden en Henrios (H). Para el diseño de un inductor con núcleo de ferrita debe conocerse del circuito dónde se conecta:

- Inductancia, L
- Corriente pico, I_p .
- Corriente eficaz, I_{rms} .
- Frecuencia, f
- Área efectiva, A_e
- Entrehierro (*Gap*), G

3.4.3 Procedimiento de diseño de inductores con núcleo de ferrita RM

Según la referencia [21] el procedimiento de diseño para el cálculo de los inductores con núcleo de ferrita es con base en la frecuencia de funcionamiento del circuito, a continuación se selecciona el tipo de material del núcleo de ferrita, en la gráfica de la figura 3.14 se muestran los diferentes materiales de núcleos utilizados a diferentes frecuencias y su comportamiento ($f \times B_{max}$).

Dado que la frecuencia de funcionamiento es a 700 kHz, según la gráfica anterior el material adecuado es el tipo 3F3[6] .

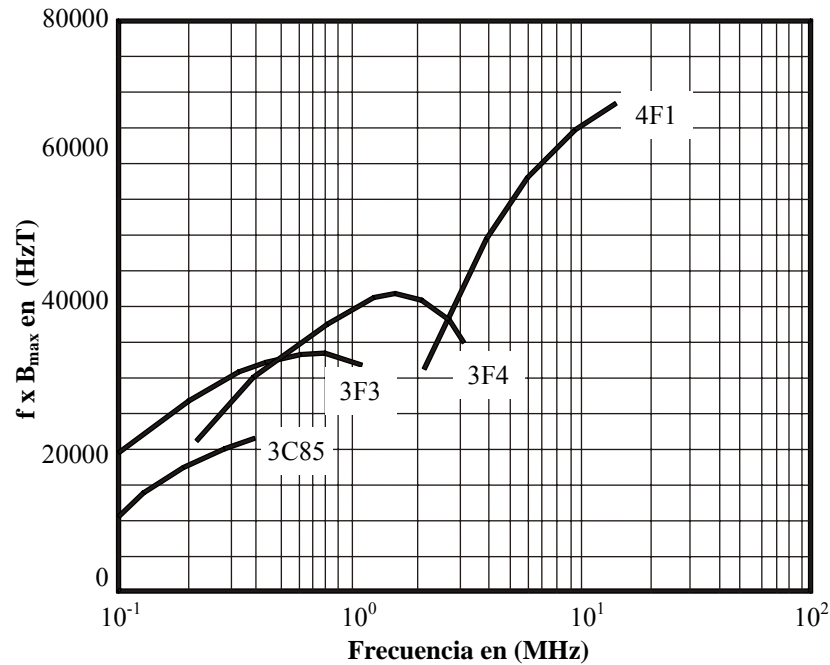


Figura 3.14 Frecuencias de los diferentes tipos de materiales de núcleos de ferrita

El paso siguiente, es seleccionar el tipo de núcleo RM dependiendo de la potencia. En la tabla 3.7 se muestra una clasificación de núcleos RM según la potencia.

Tabla 3.7 Tipo de núcleo a utilizar dependiendo de la potencia

Rango de potencias (W)	Tipo de núcleo
<5	RM4
5 a 10	RM5
10 a 20	RM6
20 a 50	RM8, RM10
50 a 100	RM12
100 a 200	RM14
>200	Otros

Para el inductor conectado en serie con la fuente se escogió el núcleo RM10 y para el inductor del tanque resonante el núcleo RM12.

3.4.3.1 Conductor de cobre

Enseguida se calcula el calibre del conductor de cobre con base en los valores de corriente y densidad de corriente. La corriente es proporcionada por el programa de diseño y la densidad de corriente del cobre aceptable se fija en un rango de 350-450 A/cm², en seguida se determina el calibre del conductor (ver tablas AGW Anexo B) [URL17] .

Cuando se trabaja a bajas frecuencias se usan conductores de cobre. Sin embargo al aumentar la frecuencia, se generan pérdidas en el conductor debido al efecto piel⁵. Para disminuir los efectos de este fenómeno, se utiliza alambre trenzado. En la práctica se utilizó hilo de Litz, puesto que una de sus características es trabajar a altas frecuencias.

El cálculo del área del conductor se hace con base en la ecuación 3.16 a partir de la corriente eficaz I_{rms} , y una densidad de corriente del cobre.

$$A_{cu} = \frac{I_{rms}}{J} \quad (3.16)$$

3.4.3.2 Número total de espiras en el núcleo RM

Se define N_{max} como el número máximo de vueltas de cobre de sección efectiva (incluyendo la superficie de aislante que normalmente es barniz) que pueden ser alojadas en un núcleo de área de ventana A_w . Esto puede ayudar a conocer el número máximo de espiras de cobre que se pueden alojar en el núcleo seleccionado se calcula por la ecuación 3.17 [URL16].

$$N_{max} = A_w \frac{K_{cu} J}{I_{rms}} \quad (3.17)$$

3.4.3.3 Número de vueltas en el inductor

Para el cálculo del número de espiras del inductor se usa la ecuación 3.18 [2], donde el valor mínimo que puede tomar el entrehierro es de 0.00001 cm:

$$N = \sqrt{\frac{0.4\pi A_e \times 10^{-8}}{LG}} \quad (3.18)$$

⁵ Efecto piel: La corriente en un conductor fluye en la capa externa; aumentando su resistencia efectiva, lo cual genera un efecto de calentamiento en el conductor.

4. Simulaciones y Resultados experimentales

En este capítulo se presentan las simulaciones del balastro electrónico en PSpice, con base en los valores obtenidos del programa de diseño. También se muestran los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. Además se hace una comparación de funcionamiento con un balastro electromagnético.

4.1 Introducción

Se utilizó el programa de simulación SPICE (Simulation Program With Integrated Circuits Emphasis), que es un programa de diseño de circuitos analógicos y digitales, para las computadoras personales y estaciones de trabajo existen diversos paquetes de software que implementan SPICE, donde el más popular es el PSpice que es el primer simulador para PC's comercialmente disponible, además de ser una herramienta muy útil en el diseño de cualquier sistema electrónico.

Las simulaciones y resultados experimentales del balastro electrónico, se realizaron en dos etapas:

- *Estado de preencendido:* en este estado se obtuvo la señal del voltaje de preencendido en la lámpara fluorescente.
- *Estado estable:* en este estado se obtuvieron las señales del voltaje y corriente en el dispositivo de potencia, en la lámpara fluorescente, además de la potencia en la misma. También se obtuvieron algunos parámetros útiles.

4.2 Simulación del circuito

La simulación del balastro electrónico se realizó con base en el circuito de la figura 4.1, en el mismo se indican los valores calculados con el programa de diseño, para obtener la potencia requerida de 21W. La lámpara fluorescente es la resistencia de carga.

A continuación se muestra la simulación de la lámpara fluorescente en el momento de arranque (estado de pre-encendido).

4.2.1 Estado de Pre-Encendido

El voltaje de pre-encendido se obtiene considerando que la lámpara fluorescente se comporta como un circuito abierto (resistencia elevada), el valor que se propone para efectuar la simulación en este estado es de 10 k Ω (figura 4.1). Esta situación se presenta cuando la lámpara fluorescente se encuentra apagada.

En la figura 4.2 se muestra la forma de onda del voltaje necesario para encender la lámpara fluorescente, se observa que, el voltaje de encendido tiene un valor máximo de 150 V para generar el arco de descarga en la lámpara. Sin embargo, este voltaje no es suficiente para encender la lámpara fluorescente de 21W, considerando que el voltaje de pre-encendido de este tipo de lámparas se encuentra en el rango de 300-500 V (ver sección 3.2.1), razón por la cual es necesario hacer un ajuste de los elementos calculados por el programa de diseño.

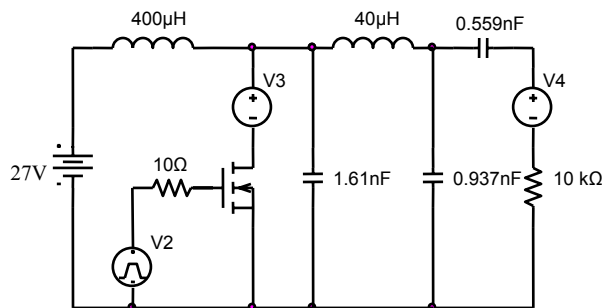


Figura 4.1 Circuito de preencendido.

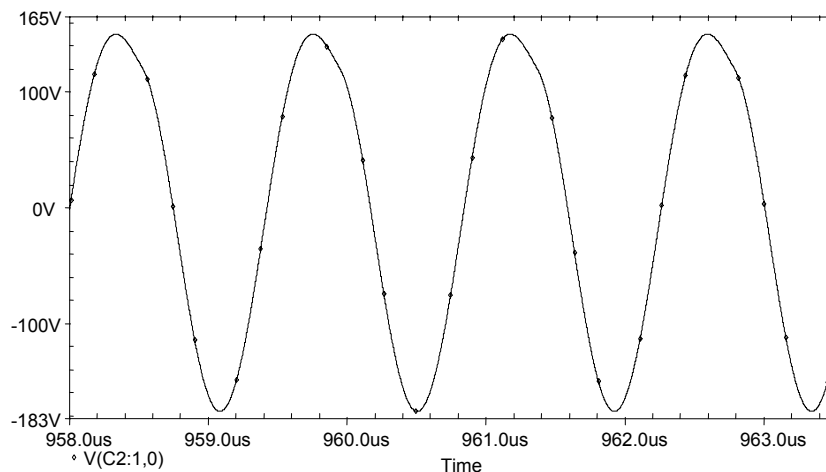


Figura 4.2 Señal de preencendido del balastro electrónico.

En la tabla 4.1 se presentan los valores modificados para encender la lámpara fluorescente y mantener la potencia de 21 W.

Tabla 4.1 Datos modificados del balastro electrónico.

Datos modificados			
Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Fuente de Alimentación	VD	42	V
Inductancia tanque resonante	Lo	45	μH
Capacitor externo	Cext	1.41	nF

El parámetro que más influye, para aumentar el voltaje de encendido, es el valor del inductor del tanque resonante (L_o), el cual se incrementó, sin embargo, al alcanzar el estado estable, la potencia en la lámpara disminuye por lo que se tiene que incrementar el voltaje de entrada, al hacer esto, el valor de la capacitancia interna del interruptor varia conforme al voltaje, por lo que se tiene que reducir el capacitor externo para que siga conmutando a voltaje cero.

Con los cambios mencionados anteriormente, el modelo para la etapa de pre-encendido se muestra en la figura 4.3. Resultando en un voltaje de preencendido con un valor máximo de 350 V suficiente para generar la descarga eléctrica y encender la lámpara fluorescente (Figura 4.4)

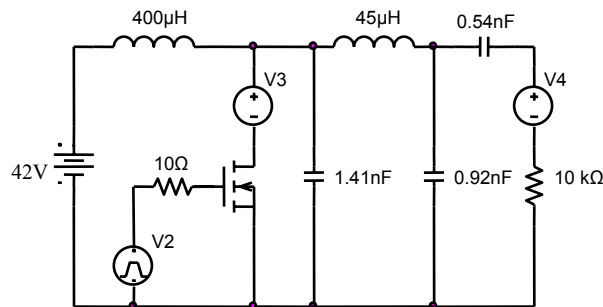


Figura 4.3 Circuito de preencendido modificado.

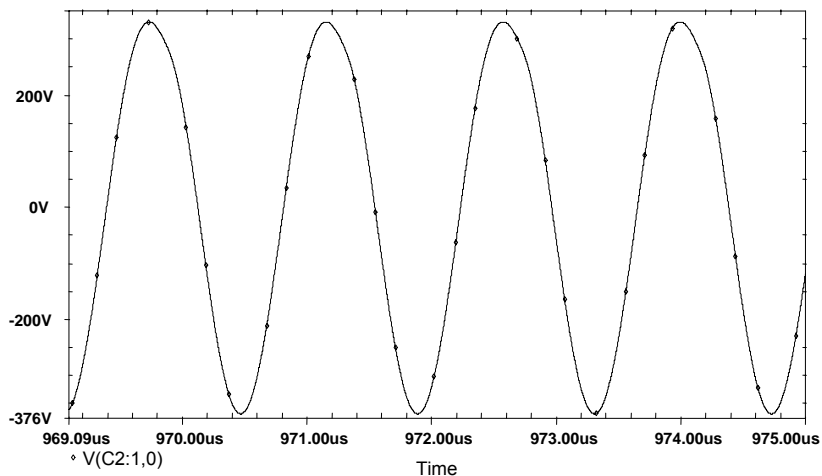


Figura 4.4 Voltaje de preencendido en la lámpara fluorescente.

4.2.2 Estado estable del balastro electrónico

A continuación se muestra la simulación del balastro electrónico en estado estable (figura 4.5), es decir cuando la lámpara fluorescente está encendida y se comporta como una resistencia.

4.2.2.1 Formas de onda en la fuente de alimentación

En la figura 4.6 se muestra el voltaje, la corriente y la potencia que suministra la fuente de alimentación.

El voltaje de entrada aplicado al circuito es de 42 V con una corriente de 0.53 A y una potencia de 21.8 W de entrada.

4.2.2.2 Formas de onda en el interruptor

En la figura 4.7 se muestra la señal de voltaje generada en el dispositivo de potencia (MOSFET), además de la señal generada por el circuito oscilador-impulsor aplicada a la compuerta. Se observa que el interruptor está conmutando a voltaje cero, dado que la señal de voltaje es cero en un instante cercano al punto en que la señal de compuerta cambia de estado (bajo a alto). Asimismo, el esfuerzo de voltaje a través del interruptor, tiene un valor aproximado de 160 V, es decir, 3.8 veces la tensión de alimentación [9].

En la figura 4.8 se muestra la señal de corriente generada en el dispositivo de potencia (MOSFET), junto a la señal generada por el circuito oscilador-impulsor aplicada a la compuerta. Se observa que el durante éste intervalo de tiempo conduce el diodo interno del interruptor, cuya manifestación se refleja con un pico de corriente negativo.

Esto significa que el dispositivo está funcionando en modo sub-óptimo y conmuta a voltaje cero. Por otro lado, el esfuerzo de corriente a través del interruptor, tiene un valor máximo de 2 A.

En la figura 4.9 se muestran las señales generadas en el dispositivo de potencia (MOSFET) de voltaje y corriente respectivamente.

Debido al tiempo de caída de la señal de corriente, en el interruptor se genera un pequeño traslape entre esta señal y la de voltaje, provocando las pérdidas de conmutación en el apagado. Contrario a lo que sucede en el apagado, en el encendido se observa que no existe presencia simultánea de ambas señales.

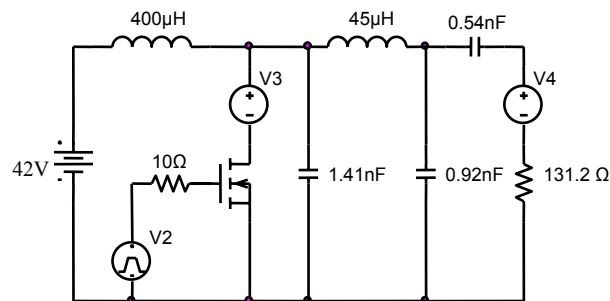


Figura 4.5 Circuito en estado estable.

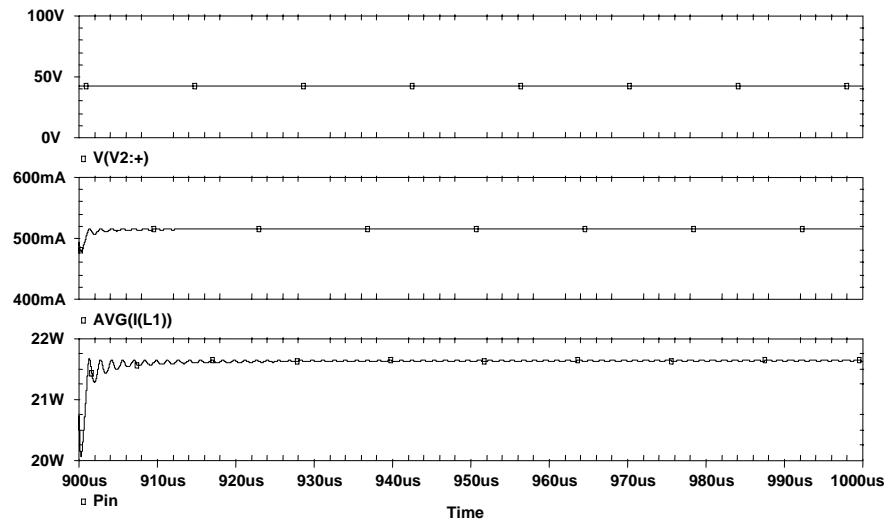


Figura 4.6 Voltaje, corriente y potencia en la fuente de alimentación.

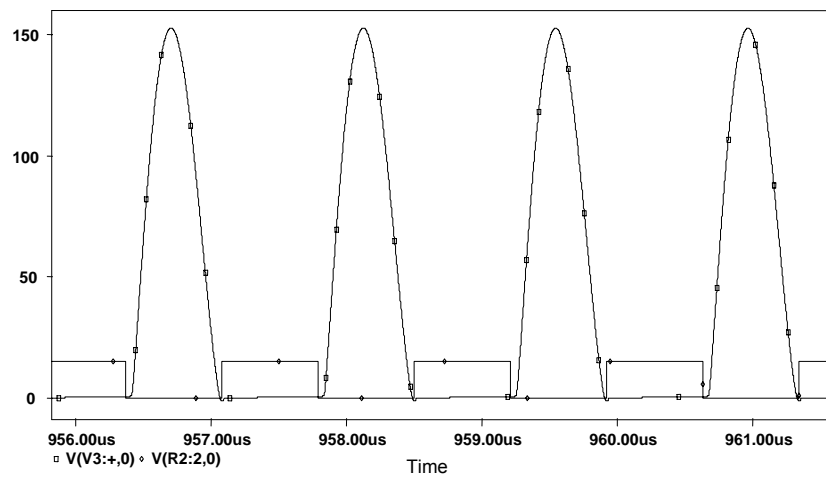


Figura 4.7 Esfuerzo de voltaje en el DSEP y señal de compuerta.

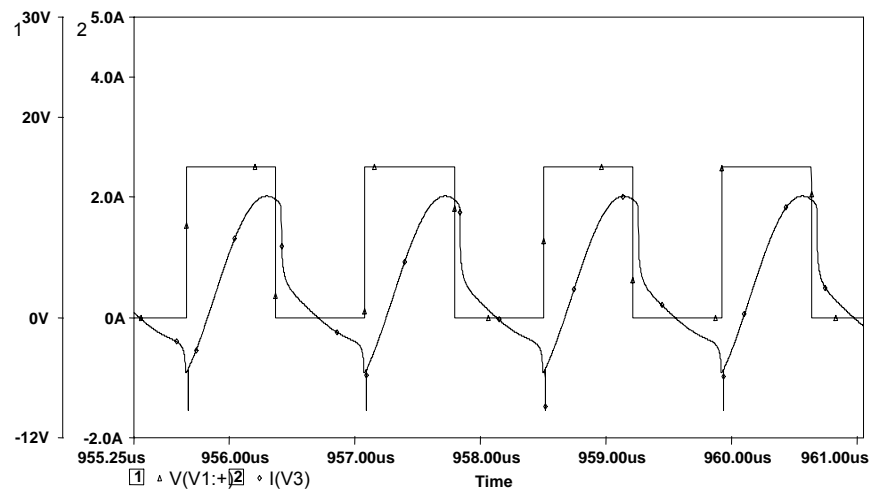


Figura 4.8 Esfuerzo de corriente en el DSEP y señal de compuerta.

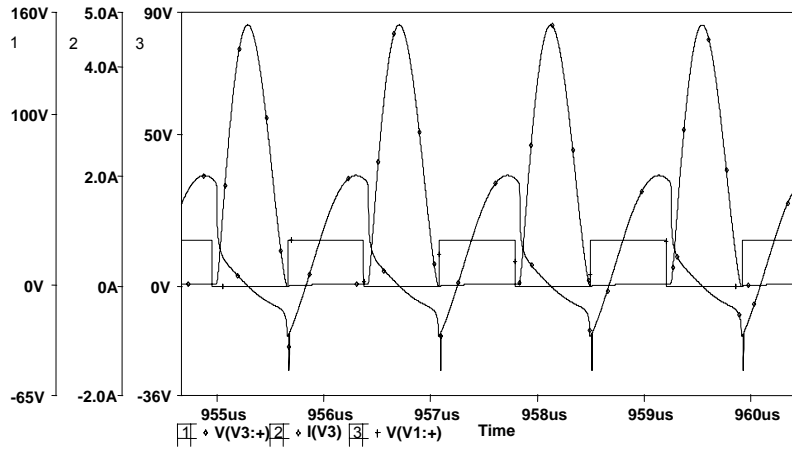


Figura 4.9 Esfuerzos de voltaje y corriente en el DSEP.

4.2.2.3 Señales en la Lámpara fluorescente

En la figura 4.10 se muestran las formas de onda de voltaje y corriente generadas en la lámpara fluorescente. Se puede apreciar que la corriente está en fase con el voltaje y ambas señales son sinusoidales y simétricas, esto se requiere para que los electrodos se gasten menos. La magnitud del voltaje es aproximadamente de 75 V y la de la corriente de 0.6 A.

En la figura 4.11 se muestra la potencia en la lámpara fluorescente. El valor que corresponde a la potencia promedio entregada por la lámpara fluorescente es de 21.25 W.

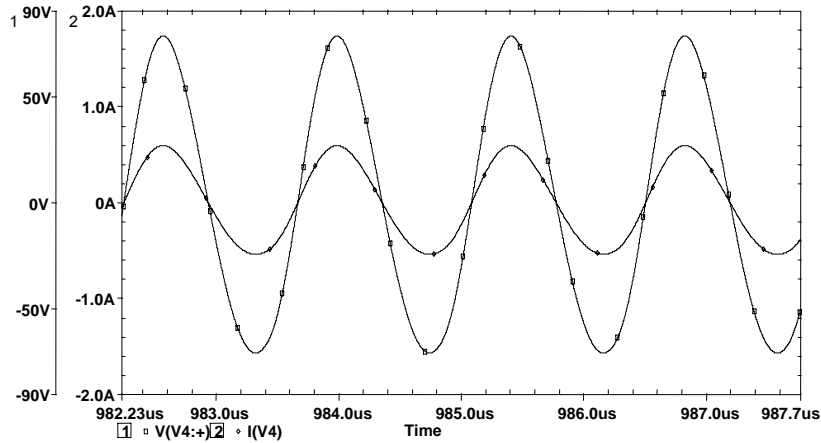


Figura 4.10 Señales de voltaje y corriente en la lámpara fluorescente.

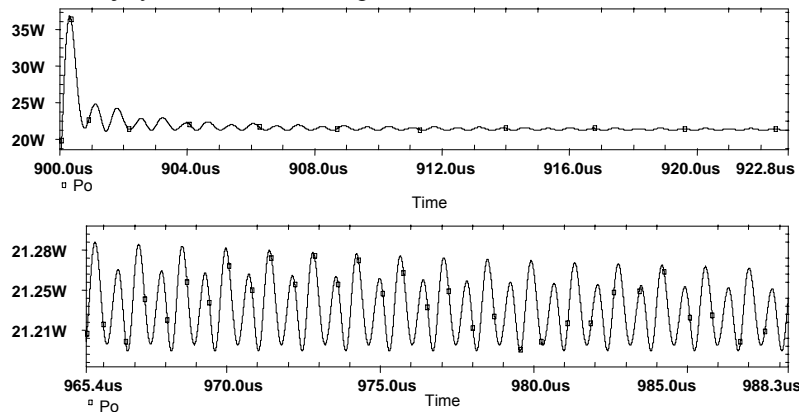


Figura 4.11 Potencia promedio en la lámpara fluorescente.

4.2.2.4 Eficiencia

En la figura 4.12 se muestra la eficiencia (P_{ent}/P_{sal}) de la lámpara fluorescente en estado estable. Dado que todos los elementos en la simulación con los que cuenta el balastro electrónico son ideales se muestra una eficiencia del 98%.

4.2.2.5 Corriente en el inductor L_o

En la figura 4.13 se muestra el valor de la corriente que pasa a través del inductor L_o . El cual es un dato útil para el diseño del balastro electrónico.

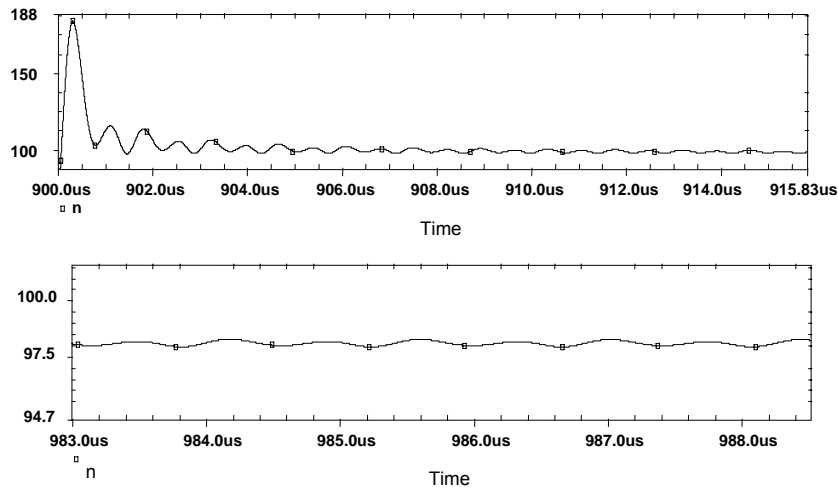


Figura 4.12 Eficiencia.

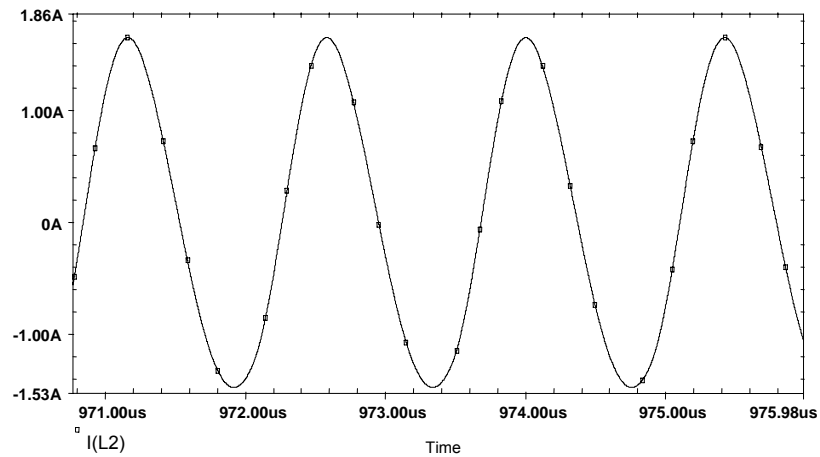


Figura 4.13 Corriente en el inductor L_o .

4.3 Prototipo experimental del Balastro Electrónico

Después de haber calculado todos los elementos y simulado el circuito se construyó el prototipo físicamente del balastro electrónico como se muestra en la figura 4.14

4.3.1 Instalación del sistema de iluminación

En el Anexo B se muestran las imágenes del equipo que se utilizó para probar el sistema completo, como las fuentes de alimentación que se ocuparon para conectarlas con el balastro electrónico, además del medidor de corriente y el osciloscopio, también se muestra el diagrama esquemático del balastro electrónico, además de la comparación de la intensidad luminosa de una lámpara fluorescente conectado a un balastro electromagnético y un electrónico.

En el diagrama a bloques de la figura 4.15 se muestra los componentes del sistema para realizar las mediciones y pruebas del laboratorio. Se utilizaron dos fuentes de alimentación de CD modelos Hp E3631A y GPC-3030D, una para alimentar el circuito oscilador-impulsor y la otra para alimentar el inversor resonante; también se utilizó un medidor de corriente Tecktronix TM502A y un osciloscopio Hp 54610B con lo que se realizaron las mediciones de los valores de voltaje y corriente en cada etapa del balastro. A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

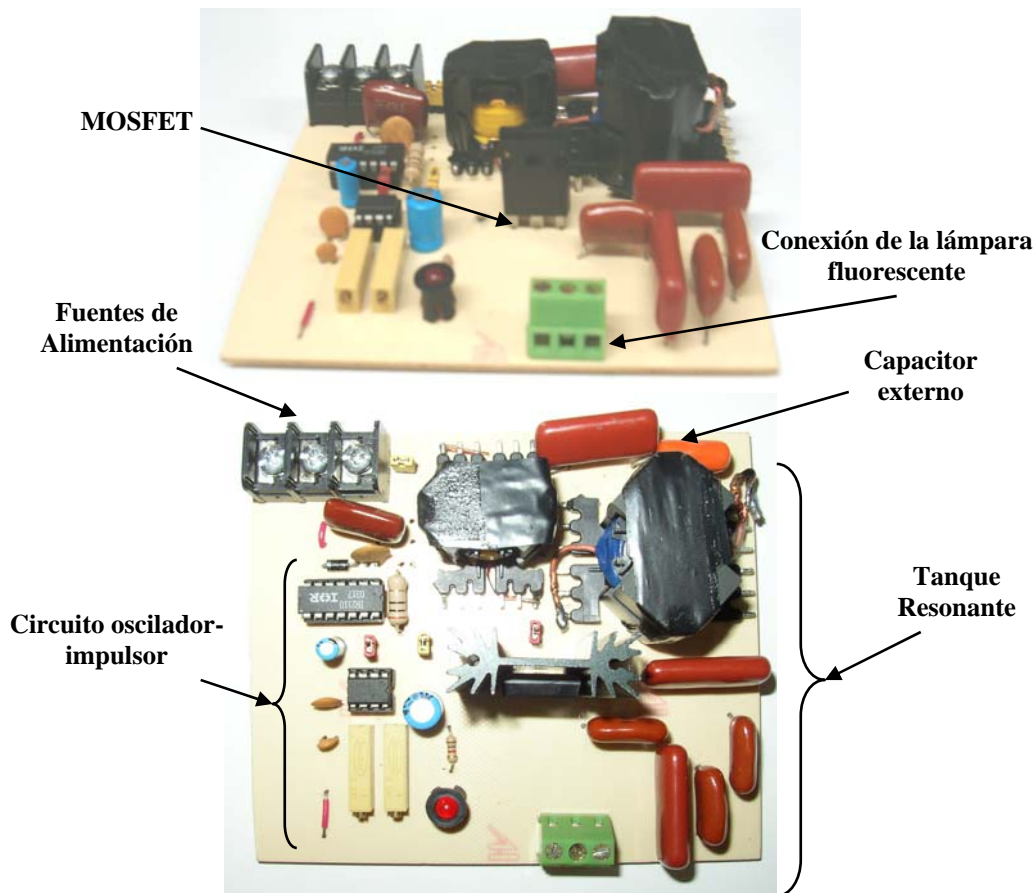


Figura 4.14 Balastro electrónico

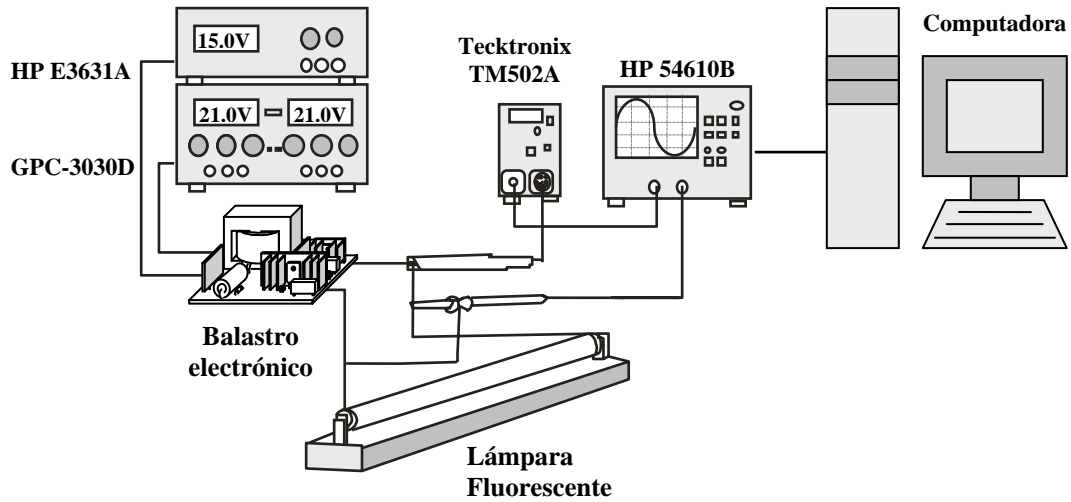


Figura 4.15 Instalación del sistema de iluminación

4.3.2 Resultados experimentales

Las simulaciones en PSpice proporcionan información muy valiosa sobre el comportamiento del balastro electrónico, pero no sustituyen completamente el comportamiento del circuito real. Sobre todo si se utilizan elementos difíciles de modelar con precisión, como es el caso de elementos magnéticos y el de la lámpara fluorescente. Por tal motivo se evaluó el comportamiento del prototipo cuyas especificaciones fueron mencionadas anteriormente.

4.3.2.1 Estado de Pre-encendido

El parámetro principal en este estado es el voltaje de encendido de la lámpara y se muestra en figura 4.16. Se puede apreciar que tiene un voltaje máximo de 362 V para generar el arco de descarga en la lámpara. También se puede observar el proceso de descarga en la lámpara (capítulo 1), viendo el pico de voltaje en el instante de pre-encendido, otra característica es que cuando se genera el arco en el interior de la lámpara, el voltaje disminuye drásticamente (figura 4.17), a un valor máximo de 79.7 V.

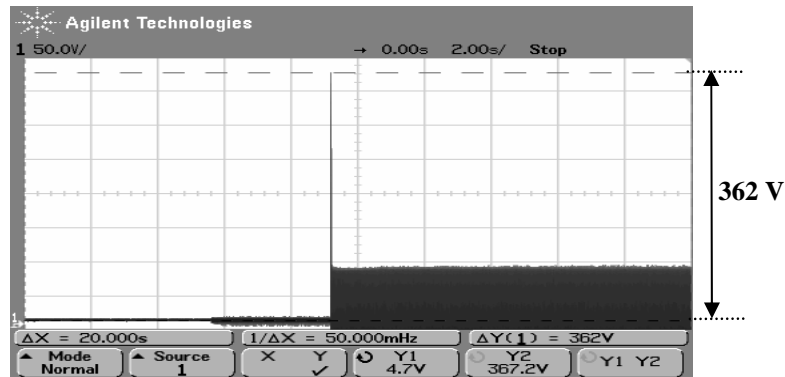


Figura 4.16 Voltaje de preencendido de la lámpara fluorescente

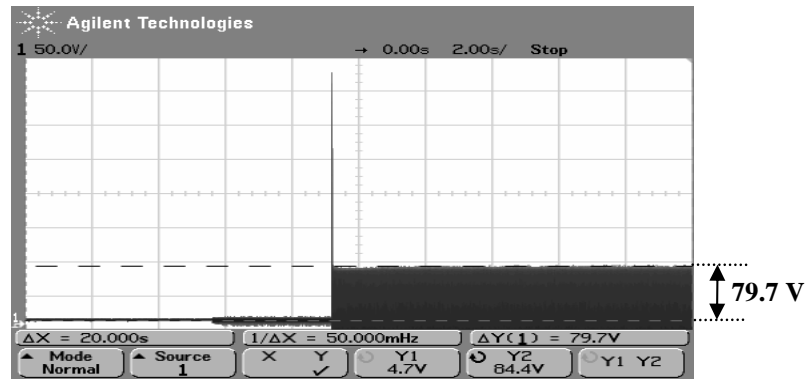


Figura 4.17 Voltaje de estado estable

4.3.2.2 Estado estable

4.3.2.2.1 Señales en la fuente de alimentación

La señal de voltaje, suministrada al circuito es de 42 V de voltaje de CD y la corriente que proporciona la fuente es de 0.63 A; con estos valores la potencia que está suministrando la fuente que es de 26.4 W.

4.3.2.2.2 Señales en el interruptor

En la figura 4.18 se muestran las formas de onda experimentales de voltaje, y en la figura 4.19 la corriente que se genera en el interruptor (MOSFET).

Se puede apreciar que el esfuerzo máximo de voltaje en el interruptor, durante este estado, es de 172 V. Este valor es cercano al obtenido a las simulaciones en Pspice y el valor de la corriente máxima es aproximadamente de 2.81 A, con una frecuencia de conmutación de 703 kHz (figura 4.7).

En figura 4.20 se muestra las formas de onda experimentales de voltaje del circuito oscilador-impulsor. En ésta figura se observa que efectivamente las transiciones entre el encendido y el apagado del interruptor y viceversa, se realizan cuando el voltaje drenaje-fuente del MOSFET es igual a cero, garantizando la conmutación a voltaje cero, sin embargo se aprecia que la señal cuadrada tiene una pequeña deformación.

En la figura 4.21 se muestra la señal de voltaje y corriente del interruptor de potencia. En ésta figura se puede observar que se está trabajando en modo sub-óptimo por que se activa el diodo interno del DESP al igual que las simulaciones (figura 4.9) también se aprecia un pequeño traslape en el apagado del dispositivo.

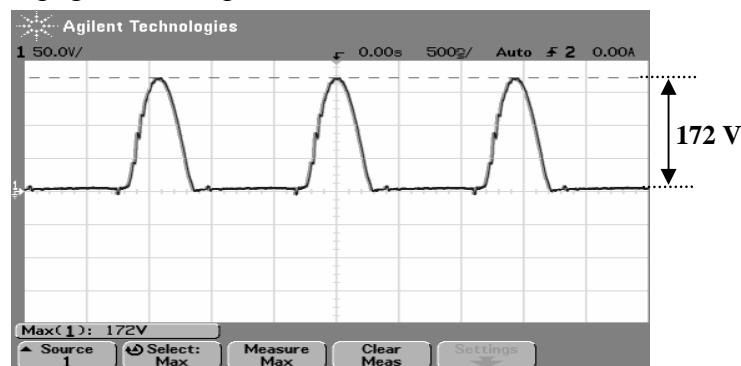


Figura 4.18 Voltaje en el interruptor

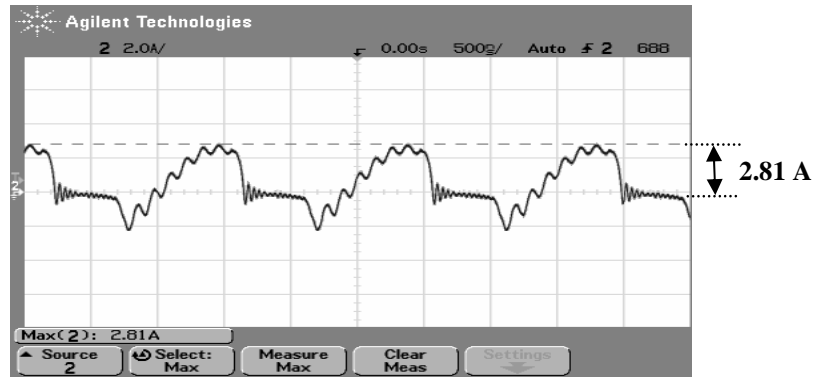


Figura 4.19 Corriente en el interruptor

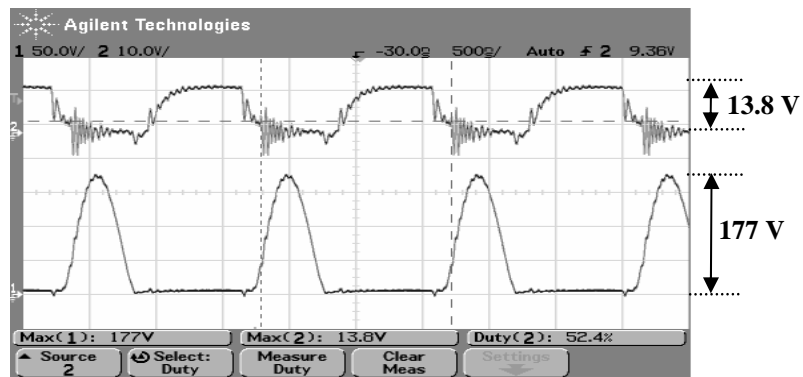


Figura 4.20 Señal de control y voltaje en el interruptor

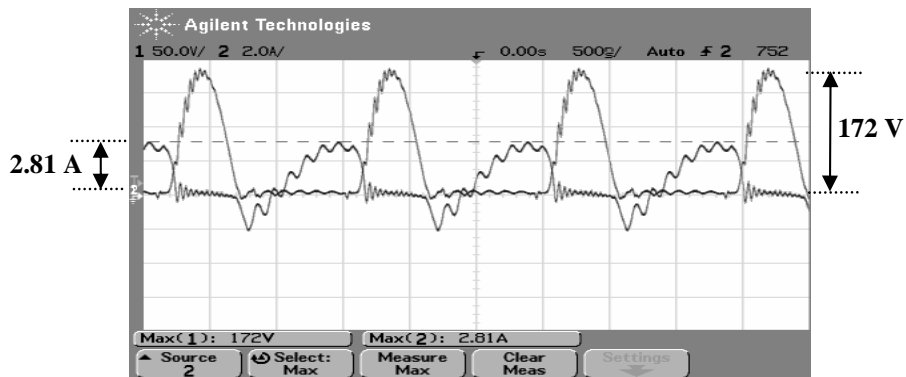


Figura 4.21 Voltaje y corriente del interruptor

4.3.2.2.3 Señales en la lámpara fluorescente

En la figura 4.22 se muestran las formas de onda de voltaje y corriente de la lámpara fluorescente en estado estable, donde se puede observar que tanto la señal de voltaje como la de corriente son ondas sinusoidales y simétricas. También se observa que las formas de onda son bastante similares a las obtenidas con la simulación en Pspice (figura 4.10). Se aprecia que el valor máximo de voltaje es de 65 V y el valor máximo de la corriente en la lámpara es de 0.76 A, a una frecuencia de conmutación de 702 kHz, además de que también están en fase.

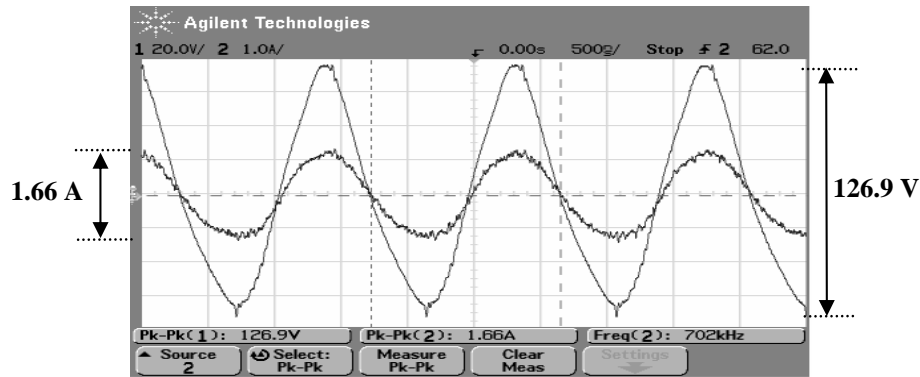


Figura 4.22 Voltaje y corriente experimentales en la lámpara

4.3.2.2.4 Potencia en la lámpara fluorescente

En la figura 4.23 se muestra la potencia instantánea suministrada a la lámpara fluorescente. En esta figura se puede apreciar que el valor de la potencia promedio suministrada a la lámpara fluorescente por el balastro electrónico es de 21.45 W.

4.3.2.2.5 Otros parámetros

En la figura 4.24 se muestra el valor experimental de la corriente que pasa a través del inductor L_o . En la figura se aprecia que el valor de la corriente que está circulando por el inductor L_o tiene un valor máximo de 1.85 A.

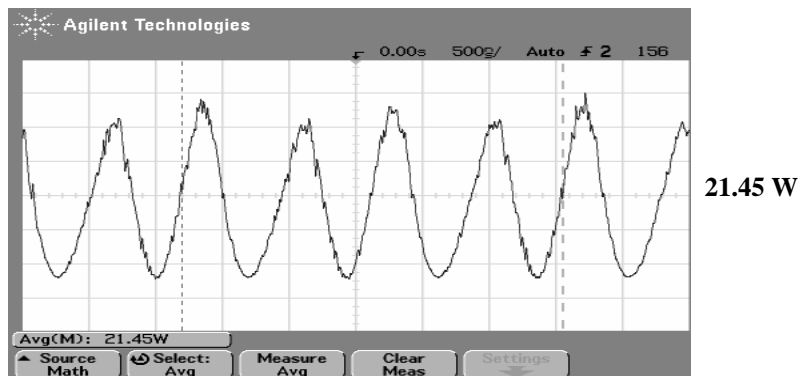


Figura 4.23 Potencia en la lámpara fluorescente

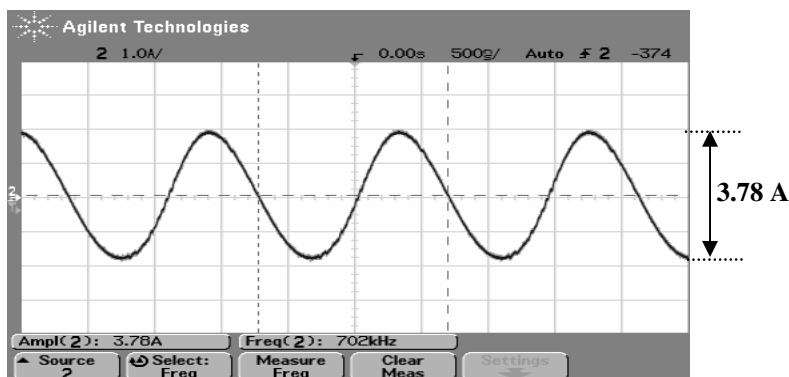


Figura 4.24 Corriente del inductor L_o

4.4 Comparación de simulaciones y resultados experimentales

En la figura 4.25 se muestran la comparación de las simulaciones con respecto a los resultados de las señales obtenidas en el laboratorio.

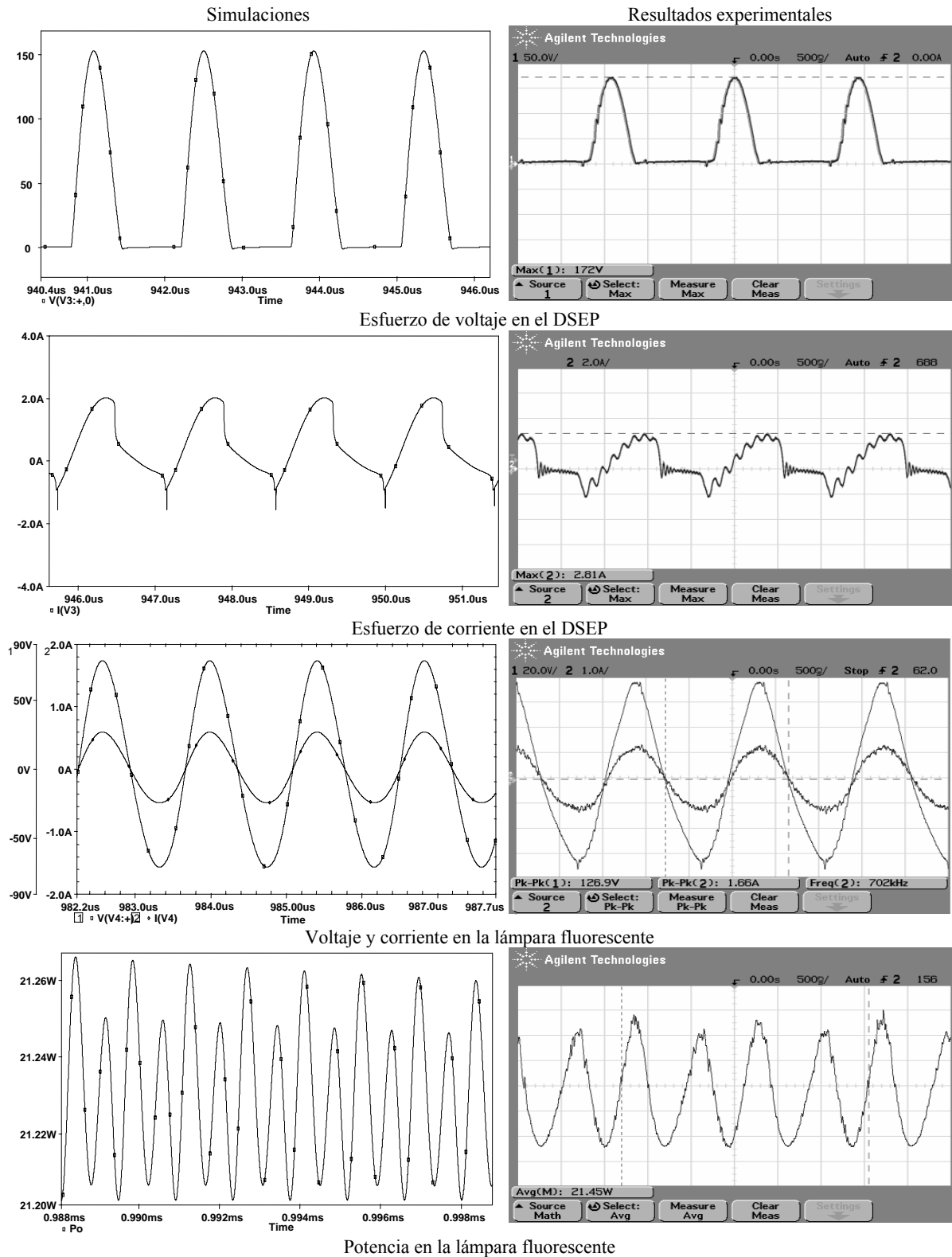


Figura 4.25 Comparación de resultados experimentales y simulaciones

En la tabla 4.2 se muestra una comparación de los valores máximos de voltaje y corriente de la simulación como de los valores experimentales, así como el porcentaje de error entre los ellos.

Tabla 4.2 Comparación de los resultados simulados y experimentales

Nombre	Resultados		Unidad	E(%)
	Simulación	Experimentales		
Inductor choque L_c	400	405	μH	-1.25
Inductor del tanque resonante L_o	45	44.2	μH	1.70
Capacitor del tanque resonante C_2	0.54	0.53	nF	1.85
Capacitor del tanque resonante C_3	0.92	0.91	nF	0.50
Capacitor externo C_{ext}	1.41	1.40	nF	0.00
V_{enc}	350	362	V	-3.40
V_{lamp}	75.0	63.5	V	15.3
V_{SW}	160	172	V	-7.50
V_{in}	42.0	42.0	V	0.00
P_{sal}	22.2	21.4	W	3.40
Eficiencia η	98.0	81.0	%	17.3

Con la ecuación 4.1 se puede calcular la distorsión armónica total (THD) de la señal de corriente y voltaje en la lámpara fluorescente, esto sirve para ver que tan sinusoidales son. En la tabla 4.3 se calcula el porcentaje de la distorsión total que genera el balastro electrónico de la señal de corriente y voltaje en la lámpara fluorescente, los armónicos de cada una de las señales se muestran en la figura 4.26.

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} V^2_{n1} + \dots + V^2_{n2}}}{V_f} * 100 \quad (4.1)$$

Tabla 4.3 Distorsión armónica total

Señal de voltaje				Señal de corriente			
	dB	V	V^2		dB	A	A^2
Fundamental	0	1	1	Fundamental	0	1	1
Armónico 1	-22.1	0.078	0.0069	Armónico 1	-22.8	0.072	0.00524
Armónico 2	-22.8	0.072	0.0052	Armónico 2	-33.4	0.021	0.00045
Armónico 3	-36.8	0.0144	0.0002	Armónico 3	-45.0	0.006	3.16E-05
Armónico 4	-33.1	0.022	0.0004	Armónico 4	-39.0	0.011	0.00012
Armónico 5	-44.3	0.006	3.72E-05	Armónico 5	-50.3	0.003	9.33E-06
Armónico 6	-57.8	0.001	1.66E-06	Armónico 6	-47.1	0.004	1.95E-05
Suma			0.01215	Suma			0.00589
Raíz			0.11023	Raíz			0.07675
THD (%)			11.021	THD (%)			7.675

Los resultados obtenidos de la distorsión armónica del voltaje fue del 11% y el de la corriente se obtuvo una distorsión total del 7.7%

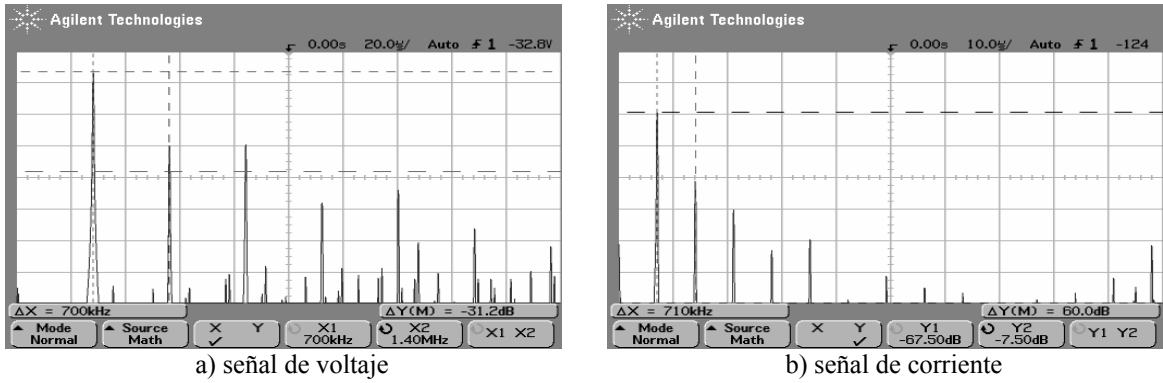


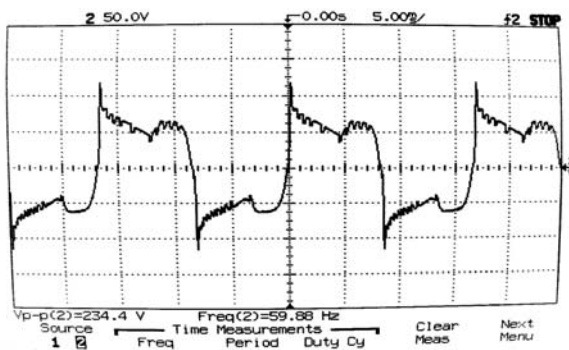
Figura 4.26 Armónicos de la señal de voltaje y corriente de la lámpara

4.4.1 Comparación con un balastro comercial

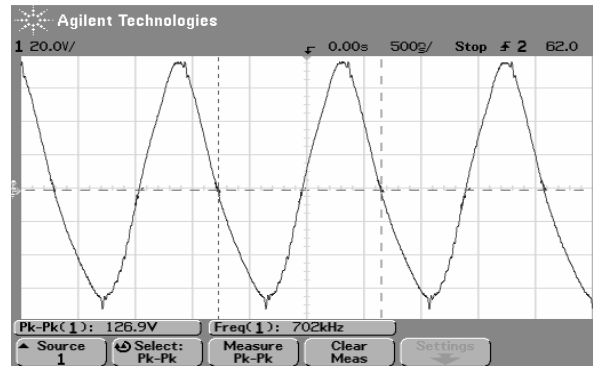
En las figuras 4.27 y 4.28 se muestran las señales de voltaje y corriente en la lámpara fluorescente de 21 W, de un balastro electromagnético y un balastro electrónico

Como se puede apreciar las señales del voltaje y corriente en la lámpara obtenida con el balastro electromagnético (figura 4.27a y 4.28a) tienen una frecuencia de 60Hz, no son completamente sinusoidales, y presentan picos elevados de voltaje y corriente respectivamente. Estos picos hacen que los electrodos de la lámpara se deterioren más rápido.

En el caso de las señales de voltaje y corriente del balastro electrónico (figura 4.27b y 4.28b) tiene una frecuencia de 700kHz, generando señales sinusoidales y simétricas. Que trae como consecuencia un deterioro menor en los electrodos de la lámpara.

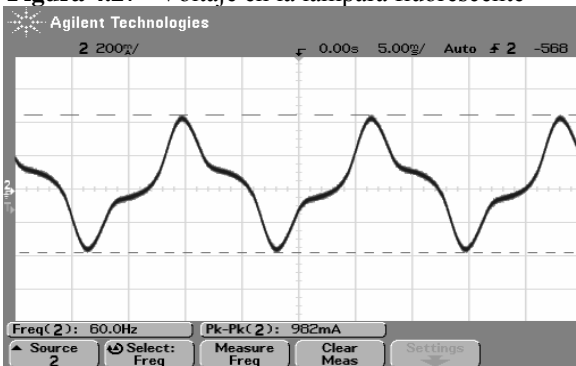


a) Señal de voltaje de un Balastro electromagnético

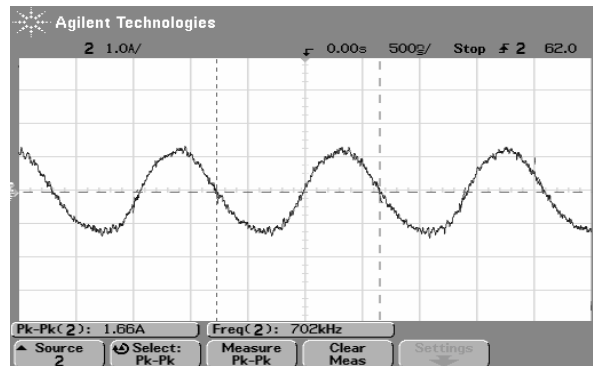


b) Señal de voltaje de un Balastro electrónico

Figura 4.27 Voltaje en la lámpara fluorescente



a) Balastro electromagnético



b) Señal de corriente de un Balastro electrónico

Figura 4.28 Corriente en la lámpara fluorescente

En la figura 4.29 se muestra el diagrama de conexiones del balastro electromagnético con la lámpara fluorescente. Así como el analizador de calidad de la energía modelo 43, marca FLUKE para medir la potencia y la distorsión armónica. En las figuras 4.30a y 4.30b, se muestran las mediciones de la potencia de entrada y salida para calcular la eficiencia del balastro electromagnético (η). Como el medidor de corriente no es sensible a valores pequeños se usaron 11 vueltas, afectando el valor de las potencias, por esta razón el valor real de la potencia se divide entre 11, dando como resultado 35.4 W en la entrada y 18.2 W en la salida, obteniendo una eficiencia del 51%.

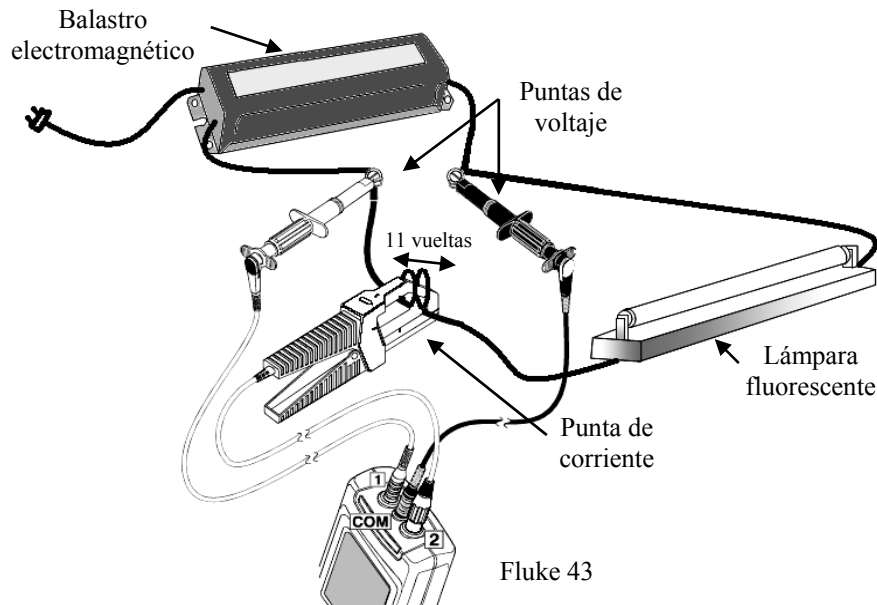


Figura 4.29 Conexión de medición del balastro electromagnético

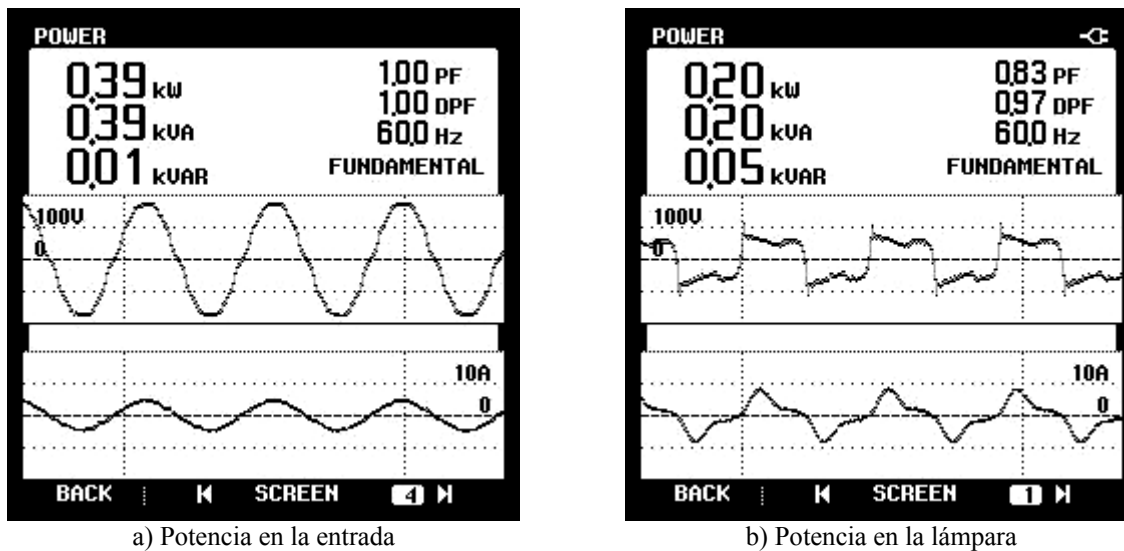
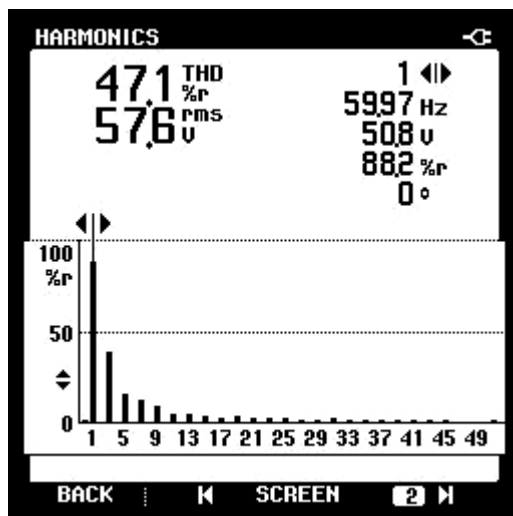
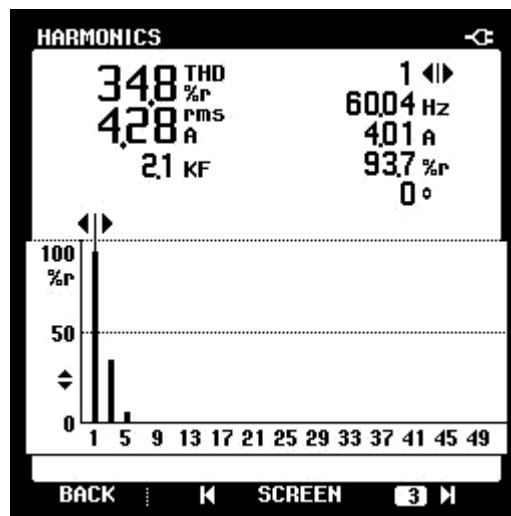


Figura 4.30 Potencia de entrada y salida del balastro electromagnético

De igual manera se obtuvo la distorsión armónica total de las señales de voltaje y corriente en la lámpara fluorescente que se muestran en la figura 4.31a y figura 4.31b, dando como resultado en la señal del voltaje una distorsión armónica total de 47.1 % y en la corriente de 34.8 %



a) Señal de voltaje



b) Señal de corriente

Figura 4.31 Armónicos en la lámpara fluorescente

5. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones generales obtenidas del trabajo desarrollado, con base en las simulaciones y en los resultados experimentales, asimismo se presentan las observaciones y trabajos futuros.

- Al hacer funcionar la lámpara fluorescente de arranque instantáneo a frecuencias altas se comprobó experimentalmente que ésta presenta un comportamiento resistivo, puesto que las señales de corriente y voltaje son sinusoidales y están en fase como se supuso en las simulaciones.
- Se comprobó experimentalmente con un balastro electromagnético que al trabajar a bajas frecuencias las señales de voltaje y corriente en la lámpara se distorsionan, deteriorando el buen funcionamiento de la misma, obteniendo un alto grado de distorsión armónica en las señales.
- Las altas frecuencias de funcionamiento, así como el uso del ACECVC contribuyen a la disminución del volumen y peso del balastro.
- El empleo de un tanque resonante (LCCS) en la etapa de salida del inversor, proporciona la señal de voltaje de preencendido así como señales sinusoidales de voltaje y corriente a la lámpara fluorescente; esta característica proporciona un desgaste simétrico de los electrodos, incrementando la vida útil de la lámpara.
- La simulación del balastro en PSpice resultó de gran ayuda para el diseño del mismo, ya que proporciona una idea de los valores a obtener, además se comprobó que los resultados experimentales tienen una gran similitud con los resultados de la simulación, ya que presentan bajos porcentajes de error.
- El uso de inductores con núcleos de ferrita e hilo de Litz contribuyó en gran medida al buen funcionamiento del balastro.

- Los tanques resonantes LCP, LCCP, LCCS no son útiles para encender lámparas de arranque rápido, debido al tipo de encendido que presentan, ya que se tiene que precalentar sus electrodos para encenderla.
- Se comprobó experimentalmente que la conmutación a voltaje cero elimina las pérdidas en el encendido del dispositivo, pero no en el apagado ya que se presenta un traslape entre las señales de voltaje y corriente. Siendo éstas y las perdidas en conducción las causantes de las pérdidas totales.
- Para el diseño del balastro electrónico únicamente se consideran condiciones de estado estable de la lámpara. Por tal motivo, con los valores de diseño obtenidos no fue posible llegar al voltaje de encendido de la misma (300-500V). Sin embargo este problema se solucionó utilizando el simulador de circuitos PSpice, en donde se considera la lámpara como un circuito abierto y se ajustan algunos elementos del circuito para llegar al voltaje necesario.

5.1 Trabajos futuros

En la actualidad los sistemas de iluminación tienen mucha importancia para el desarrollo de cualquier país, siendo necesario la investigación de sistemas más eficientes que contribuyan al ahorro de energía.

Considerando lo anterior como trabajos futuros se plantean lo siguiente:

- Considerar las pérdidas en los elementos reactivos, para tener resultados más reales. Además de el modelado de la lámpara para conocer el comportamiento real, sobretodo en la fase de pre-encendido y hacer más aproximado los cálculos y tener mejor funcionamiento del circuito.
- Se plantea el diseño y construcción de un balastro electrónico auto-oscilante, con la finalidad de reducir el tamaño y costo del mismo, puesto que se elimina la necesidad de utilizar circuitos integrados que en ocasiones son difíciles de conseguir.
- Diseño y construcción de un balastro electrónico alimentado desde la línea de potencia, para encender una lámpara fluorescente de arranque rápido que incluya un circuito de corrección de factor de potencia y control de la intensidad luminosa.
- Diseño y construcción de un balastro electrónico para encender una lámpara de alta intensidad de descarga.

6. Bibliografía

- [1] Bitmal K. Bose & Fellow., “Recent Advance in power electronics”, Proceedings of the IEEE Industrial Electronics, Vol. 7, pp. 27-30, Pacific Grove CA (USA). Nov 1990.
- [2] Colonel Wm. T. McLyman,”Transformer and inductor Design Handbook”, second edition, Pasadena California.
- [3] Coughlin R. y Driscoll F.,”Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales”, 5 Edición, Prentice Hall Hispanoamérica, México, 2000.
- [4] ETI:”iluminación artificial de alta eficiencia”, lámparas de descarga de gas y los componentes eléctricos asociados.
- [5] Fairchild Semiconductor,”1N4937”, Datasheet, Fast Diode Rectifiers.
- [6] FERROXCUBE, “Material 3F3”, Datasheet, 3F3 specifications.
- [7] FERROXCUBE, “Product selection guide 2003”, hojas de datos, Material, accessories, applications, Specifications all type Cores.
- [8] FERROXCUBE, “soft ferrite”, Datasheet, RM, RM/I, RM/ILP cores and accessories.
- [9] Guerrero, E., “Estudio del desempeño del amplificador clase E conmutado a voltaje cero utilizando diferentes dispositivos semiconductores de potencia como interruptor”, Tesis de maestría. Cenidet, Cuernavaca, Mor. (México). 2004.
- [10] Harper, E., Manual práctico del alumbrado, Limusa, 2003.
- [11] Hiro S., Iwao S. & Shinsaku M., “Computation of Design Values for Class E Amplifiers Without Using Waveforms Equations”, Fundamental theory and applications, IEEE Transactions on Circuits and Systems”, Vol. CS-49, pp. 966-978, No. 7, July 2002.
- [12] Internation Rectifier,”IR2110”, Datasheet, controlador de compuerta Mosfet e IGBT.

- [13] International Rectifier, "HV Floating MOS-Gate Driver IC's", hojas de datos, application notes.
- [14] International Rectifier, "IRFP450", Datasheet, Power semiconductor switch.
- [15] Kazimierzuk, M. "Electronic Ballast for fluorescent lamps" Department of Electrical engineering, University of Daytona Ohio (USA). July 1993.
- [16] Lamaison R., "Electrónica de potencia", Inversores Resonantes, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC.
- [17] MAGNETICS, "Ferrite Cores", Datasheet, RM Cores. 2001
- [18] Mora, I., "Balastro electrónico para lámpara fluorescente basado en un amplificador clase E operando a una frecuencia mayor a 1 MHz", Tesis de Maestría. Cenidet, Cuernavaca, Mor. (México), 1998.
- [19] National Semiconductor, "LMC555", Datasheet, CMOS TIMER. August 2000.
- [20] Obralux, "luminotecnia", Principios de iluminación.
- [21] Philips Corporation, "Magnetic Products", Data sheet Applications Soft Ferrites, Philips Corporation, pp, 1-43, October 1998.
- [22] Rashid, M., Electrónica de potencia; circuitos, dispositivos y aplicaciones, Prentice Hall, segunda edición, 1995.
- [23] Semiconductor Farchild: "1N4937", Datasheet, fast diode rectifier.
- [24] Suetsugu, T. & Kazimierzuk, M., "Analysis and Design of Class E Amplifier with Shunt Capacitance Composed of Nonlinear and Linear Capacitances", IEEE Transactions on Circuits and Systems", Vol. CS-50, No. 8, pp. 1089-1097, August 2003.

6.1 Páginas de internet

- [URL1] “Clasificación general de las Lámparas (incandescentes)”, Copyright © 2001. <http://www.richetta.com.ar>, (15 de Dic 2003)
- [URL2] García, Javier F., Oct 2002. “luminotecnia, Clasificación de lámparas de descarga, conceptos”, <http://edison.upc.es>, (6 enero 2004).
- [URL3] “Iluminación eléctrica”, Enciclopedia Microsoft® Encarta® Online 2004, <http://es.encarta.msn.com> © 1997-2004 Microsoft Corporation, (10 mayo 2004).
- [URL4] Aplicaciones Electrónicas Industriales, “Balastos comerciales especificaciones”, <http://www.iaf.es/enciclopedia/apein/balasto2.htm>, “Características de los balastos electrónicos”, http://insma.udg.es/ambientalitzacio/linies/recursos/reactancies_electroniques.htm (20 julio 2004).
- [URL5] “clasificación de las Lámparas incandescentes” <http://usuarios.lycos.es/bombiluz0/id13.htm> (mayo 2004).
- [URL6] “lámparas incandescentes modernas Sica News” 2002 <http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia/sica79.html> (mayo 2004).
- [URL7] Enrriquez, Bruno., “la luz sin llamas; Breve historia de la luminiscencia”. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia14/HTML/articulo07.htm>
- [URL8] “Como funcionan las lámparas fluorescentes” http://www.cablenet.com.ni/curiosidades/como_funcionan/lamparas.html
- [URL9] “clasificación de lámparas fluorescentes” <http://usuarios.lycos.es/bombiluz0/id11.htm>
- [URL10] “Lámparas fluorescentes” www.geiluminacion.com/mx/download/4.fluorescentes.pdf
- [URL11] “Terminología de la Iluminación Eléctrica” <http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/instalacelectricas/31.htm>
- [URL12] “Lámparas y sus componentes” <http://bdd.unizar.es/Pag2/Tomo2/tema8/8-2.htm>
- [URL13] “Balastos electrónicos de alta frecuencia” <http://www.elt.es/formacion/cuaderno5/cuaderno5.htm>
- [URL14] “Imperfecciones en los componentes pasivos” <http://www.monografias.com/trabajos/compelectropas/compelectropas.shtml>
- [URL15] “Inductores” <http://www.geocities.com/CollegePark/Pool/1549/electronica2/dispo03.html>

- [URL16] “Componentes Reactivos, Consideraciones practicas”
www.gte.us.es/~leopoldo/Store/tsp_11.pdf
- [URL17] “Tabla de calibres de alambre de cobre AWG (REVISED AWG Wire Table for Coilers)” <http://www.pupman.com/listarchives/1998/April/msg00222.html>
- [URL18] Leonardo Assaf, “Equipos auxiliares de fuentes de iluminación”, Capitulo 6. Luminotecnia, <http://www.herrera.unt.edu.ar/dllyv/publicaciones/libros.htm>
- [URL19] Beatriz M, O’Donell, Jose D. Sandoval, Fernando Paukste, “Fuentes Luminosas” Capitulo 4, Luminotecnia,
<http://www.herrera.unt.edu.ar/dllyv/publicaciones/libros.htm>
- [URL20] “La física de la descarga gaseosa”, Capitulo 1,
<http://www.lfp.uba.ar/Kelly/teoricas/>
- [URL21] “El Proceso de Ruptura de los Gases”, Capitulo 4,
<http://www.lfp.uba.ar/Kelly/teoricas/>
- [URL22] “Arco Eléctrico”, Capitulo 7, <http://www.lfp.uba.ar/Kelly/teoricas/>
- [URL23] “Descarga Glow”, Capitulo 5, <http://www.lfp.uba.ar/Kelly/teoricas/>
- [URL24] “Descripción general de la iluminación”, <http://energyaudit-sdgc.sempra.com/spanish/library/lighting.asp>