



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELECTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRONICA, AUTOMATIZACIÓN
Y CONTROL

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORES: REGALADO BASANTES, GIOVANNY FERNANDO
VILLACIS DIAZ, NESTOR DAVID

TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN CONTROL FUZZY PARA UN
BALASTRO ELECTRONICO DE UNA LÁMPARA HID-MH

DIRECTOR: ING. AYALA, PAUL Msc.

CODIRECTOR: ING. PROAÑO, VICTOR Msc.

SANGOLQUÍ, MARZO 2014

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FUZZY PARA UN BALASTRO ELECTRÓNICO DE UNA LÁMPARA HID-MH** ha sido desarrollado en su totalidad por el señor **GIOVANNY FERNANDO REGALADO BASANTES** con CI: 1711373157 y **NÉSTOR DAVID VILLACIS DÍAZ** con CI: 1712331352 bajo nuestra dirección.

Atentamente,

Sr. Ing. Paúl Ayala
DIRECTOR

Sr. Ing. Víctor Proaño
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

GIOVANNY FERNANDO REGALADO BASANTES

NESTOR DAVID VILLACIS DIAZ

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FUZZY PARA UN BALASTRO ELECTRÓNICO DE UNA LÁMPARA HID-MH, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, ----- del 2014

Sr. Giovanni Regalado

Sr. Néstor Villacís

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, GIOVANNY FERNANDO REGALADO BASANTES

NESTOR DAVID VILLACIS DIAZ

DECLARAMOS QUE:

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FUZZY PARA UN BALASTRO ELECTRÓNICO DE UNA LÁMPARA HID-MH, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, ----- del 2014

Sr. Giovanni Regalado

Sr. Néstor Villacis

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mi Dios por haberme permitido llegar hasta esta etapa de mi vida, a mi familia por su apoyo incondicional porque siempre estuvieron incentivándome y dándome palabras de aliento para dar lo mejor de mí, a mi compañero de tesis y amigo Giovanni Regalado que ante cualquier adversidad se logró realizar esta tesis, a mi Director, Paul Ayala y Codirector, Víctor Proaño que siempre estuvieron ahí para enseñarme y ayudarme en todas mis dudas y problemas que se presentaron.

Néstor Villacís

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitido culminar esta etapa tan importante de mi vida, a mi familia que supo apoyarme en todas mis necesidades y dificultades.

A Darío, Katy y David mis compañeros de estudio los cuales tuve su incondicional apoyo, en especial a David mi compañero de tesis con el cual hemos pasado muchas dificultades pero con esfuerzo y ahínco logramos terminar esta tesis.

A mi Director, Paul Ayala y Codirector, Víctor Proaño que supieron guiarnos y darnos consejos muy valiosos que se presentaron.

Giovanny Regalado

DEDICATORIA

A MI DIOS, A MIS PADRES, Y HERMANO.

Néstor Villacís

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mis padres y hermana quienes me apoyaron y motivaron en todo momento, contribuyendo incondicionalmente a lograr todas mis metas y objetivos propuestos.

Espero que toda la dedicación y esfuerzo empleado en este proyecto y a lo largo de mi toda vida estudiantil corresponda de alguna manera a todo lo que ellos me han brindado en todos estos años de estudio.

Giovanny Regalado

Indice General

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e Importancia.....	2
1.3. Alcance Del Proyecto.....	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. General	4
1.4.2. Específicos	4

CAPÍTULO 2

LÁMPARAS DE ALTA INTENSIDAD DE DESCARGA HID

2.1. Conceptos Generales	6
2.2. Lámparas De Alta Intensidad De Descarga (HID).....	9
2.2.1. Clasificación De Las Lámparas HID.....	10
2.2.2. Encendido De Lámparas De Alta Intensidad De Descarga	12
2.2.3. Proceso De Estabilización De La Lámpara HID.....	15
2.3. El Balastro	16
2.3.1. Clasificación De Balastros	17
2.3.2. Estructura del Balastro Electrónico.....	20
2.4. El Fenómeno De Resonancias Acústicas	21
2.4.1. Características	22
2.4.2. Tipo de resonancias acústicas	22

2.5. Lógica Fuzzy	26
2.5.1. Antecedentes de los Conjuntos Difusos	26
2.5.2. Fundamentos	30
2.5.3. Control Difuso.....	35
2.6. Buck-Boost.....	42
2.6.1. Sistemas de estructura variable	42
2.6.2. Modelamiento Matemático	42
2.6.3. Operación En Modo Continuo.	47
2.7. Inversor En Puente Completo.....	50

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BALASTRO Y EL CONTROLADOR FUZZY.

3.1. Filosofía de Operación	54
3.2. Diseño Del Controlador Fuzzy	55
3.2.1 Selección De Entradas Y Salidas.	56
3.2.2 Fusificación.....	58
3.2.3. Mecanismo De Inferencia	62
3.2.4. Desfusificación.....	63
3.3. Simulación Del Control Fuzzy.....	64
3.4. Implementación Del Balastro.....	67
3.4.1. Diseño E Implementación Del Buck-Boost	67
3.4.2 Implementación Puente H.....	79
3.4 Características De Funcionamiento.....	82

3.4.1 Procedimiento de encendido	82
--	----

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Buck Boost	84
----------------------	----

4.1.1 Buck Boost con Carga.....	84
---------------------------------	----

4.1.2. Buck Boost sin Carga.....	87
----------------------------------	----

4.1.3. Perdida de los Mosfets	88
-------------------------------------	----

4.2. Puente H.....	92
--------------------	----

4.3 Formas De Onda Del Balastro Implementado	95
--	----

4.4.1 Salida del Balastro	95
---------------------------------	----

4.4.1 Conversor Buck-Boost Sin Señal de Control.....	97
--	----

4.4.2 Conversor Buck-Boost Con Señal de Control	98
---	----

CAPÍTULO 5

Conclusiones	99
--------------------	----

Recomendaciones	101
-----------------------	-----

Índice de Imágenes

Figura 1: Estructura general de la lámpara HID	9
Figura 2: Lámparas de halogenuros metálicos.....	12
Figura 3: Proceso de descarga en lámpara HID.....	15
Figura 4: El balastro.....	16
Figura 5: Formas de onda de voltaje y corriente en lámparas HID.....	19
Figura 7: Etapas del balastro electrónico	21
Figura 8: Tipos de deformación del arco de descarga debido a acústica.....	23
Figura 9: Resonancias acústicas en una lámpara HID de 250 w.....	24
Figura 10: Localización de resonancias acústicas en diferentes lámparas HID	25
Figura 11: Arco de descarga de una lámpara de halogenuros metálicos.....	25
Figura 12: Complejidad contra precisión de un sistema	29
Figura 13: Función de pertenencia triangular	31
Figura 14: Función de pertenencia trapezoidal	32
Figura 15: Función de pertenencia gamma	32
Figura 16: Función de pertenencia gamma	33
Figura 17: Conjuntos.....	34
Figura 18: Unión de conjuntos.....	34
Figura 20: Complemento de conjuntos	35
Figura 21: Complemento de conjuntos	37

Figura 22: Buck-Boost no invertido.....	43
Figura 23: Buck-Boost Q1 y Q2 ON.	44
Figura 24: Buck-Boost Q1 y Q2 OFF.....	45
Figura 25: Formas de onda del Buck-Boost.....	48
Figura 26: Inversor en puente completo.	51
Figura 27: Inversor en puente completo Q1 y Q4 ON.....	51
Figura 28: Inversor en puente completo Q2 y Q3 ON.....	52
Figura 29: Inversor en puente completo funcionamiento unipolar.	52
Figura 30: Lógica Difusa.	56
Figura 31: Entradas y salidas del control Fuzzy.	56
Figura 32: Función de pertenencia.....	59
Figura 33: Función de pertenencia entrada y salida.....	59
Figura 34: Grande Negativo.....	60
Figura 35: Pequeño Negativo.....	60
Figura 37: Pequeño Positivo	61
Figura 38: Grande Positivo	62
Figura 39: Áreas de activación de reglas.	64
Figura 40: Balastro Electrónico en simulink.....	65
Figura 41 Corriente en el balastro electrónico sin control.....	65
Figura 42 Corriente en el balastro electrónico con control.....	66
Figura 43: Rectificador de onda completa.	68
Figura 44: Rectificador de onda completa a implementar.	70

Figura 45: Formas de onda de la IL critica.	71
Figura 46: Núcleo Toroidal.....	75
Figura 47: Etapa de Potencia del Buck Boost.....	77
Figura 48: Acoplador 6N137	78
Figura 49: Drivers y Circuito bootstrap	79
Figura 50: Etapa de Potencia del Puente H.....	80
Figura 51 Etapa de Control del Puente H.....	81
Figura 52: Señal de salida del sistema a una escala de 200 [mV].....	83
Figura 53 Circuito Buck Boost	85
Figura 54 Circuito Buck Boost	87
Figura 55: Mosfet Ideal.....	89
Figura 56: Mosfet Real.....	90
Figura 57: Pérdidas	91
Figura 58: Corrección de las Pérdidas.	92
Figura 59: Puente H	92
Figura 60: Señal de Salida del Puente H.....	96
Figura 61: Buck-Boost Sin Señal de Control.....	97
Figura 62: Puente H	98
Figura A1.1 Esquema del puente H etapa de potencia. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura A1.1 Esquema del puente H etapa de control ¡Error! Marcador no definido.	
Figura A1.3 Esquema del Buck-boost. ¡Error! Marcador no definido.	

Figura A1.4 Esquema de control para Mosfet del Buck-Boost. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A1.5 Esquema del controlador del balastro. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A2.1 Ruteado de puente H etapa de potencia. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A2.2 Ruteado de etapa de control para Mosfet del Puente H. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A2.4 Esquema de control para Mosfet del Buck-Boost. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A2.5 Esquema del controlador del balastro. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A3.1 Esquema del acondicionamiento del ACS712. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A3.2 Sensor de corriente tamaño real ACS712. **¡Error! Marcador no definido.**

Índice de Tablas

Tabla 1: Interpretación de la agregación bajo varias implicaciones	38
Tabla 2: Reacción de implicación del balastro electrónico.....	63
Tabla 3: Características del Núcleo toroidal	75
Tabla 4 Buck Boost Con Carga.....	85
Tabla 5: Buck Boost con ciclo de trabajo pasó de uno	86
Tabla 6: Buck Boost sin Carga	87
Tabla 7 Valores Puente H	93
Tabla 8: Puente H con resistencia de 30 ohm	94
Tabla 9: Puente H con resistencia de 20 ohm	95

RESUMEN

El presente documento recopila información del desarrollo y la implementación de un controlador Fuzzy para un balastro electrónico de una lámpara HID-MH de 250W. Para lograr este objetivo una etapa importante del desarrollo del proyecto es conocer los rangos de frecuencia donde la lámpara funciona de manera estable y donde se producían resonancias acústicas con ello se identificó la región de trabajo más óptima de la planta y en ésta se realizó el control de la corriente en la lámpara para hacerla trabajar a máxima potencia sin riesgo de que la misma entre en resonancia acústica. Dentro del diseño del hardware se ha empleado un convertor CD/CD que servirá como fuente el cual alimentará a un convertor CD/CA el cual generará la onda cuadrada para la lámpara. Dentro del diseño de software se presenta el algoritmo utilizado para realizar el controlador Fuzzy.

PALABRAS CLAVES: Balastro electrónico, Control Fuzzy, Resonancia Acústica, HID-MH

PROJECT SUMMARY

This document compiles information on the development and implementation of a Fuzzy controller electronic ballast for a HID-250W MH lamp. To achieve this goal an important stage of development of the project is to know the frequency ranges where the lamp runs stably where acoustic resonances and thus the optimal working region of the plant was identified and this control was performed occurred the current in the lamp to make it work at full power without the risk that the same comes into acoustic resonance. Within the design of the hardware has employed a DC / DC converter that will serve as a source which feed a CD / AC converter will generate the waveform for lamp block within the software design is presented the algorithm used to perform the Fuzzy Controller

KEYWORDS: Electronic Ballast, Fuzzy Control, Acoustic Resonance, HID-MH

PRÓLOGO

La iluminación adecuada ya sea en el hogar, centros laborales, centros educativos y espacios de entretenimiento es de gran importancia para el desarrollo de las actividades cotidianas; es por esto que en el campo de la investigación se trabaja en el desarrollo de sistemas de iluminación que mejoren el ambiente visual en el que se desempeñan cada una de estas actividades ahorrando energía de manera eficiente.

El mercado de la iluminación ha ido avanzando cada día más en la creación de productos innovadores y sustentables que contribuyan al logro de este objetivo uno de ellos es el desarrollo de sistemas de iluminación basados en lámparas de alta intensidad de descarga de Halogenuros metálicos (lámparas HID MH) este tipo de lámparas se utilizaban solamente en aplicaciones industriales y para la iluminación de exteriores pero hoy en día con el desarrollo de nuevas tecnologías en su fabricación se han abierto nuevas opciones para la aplicación de este tipo de lámparas; por ejemplo, en la iluminación en centros comerciales, en aplicaciones automotrices e incluso en aplicaciones domésticas.

Este tipo de lámparas requieren de pulsos de voltaje de elevada amplitud para iniciar la descarga, por lo que se requiere de un balastro para limitar la corriente

después de que la lámpara enciende y así poder estabilizar la descarga sin embargo el principio de operación de estas lámparas presentan un grave problema y es que la potencia instantánea de la lámpara es variable.

Esta modulación de la potencia provoca una contorsión del arco de descarga y se le conoce con el nombre de resonancia acústica. Las resonancias acústicas provocan parpadeo en la luz producida por la lámpara, en casos extremos, la destrucción de la misma. Estas resonancias se producen cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del gas de relleno de la lámpara.

Uno de los tópicos que han adquirido gran importancia en el campo de la electrónica de potencia en los últimos años, es el control de los sistemas de iluminación y específicamente el control de las resonancias acústicas por tal motivo es necesario conocer el comportamiento de las lámparas de descarga a través del modelamiento.

La lógica Fuzzy una técnica que permite describir algunos aspectos de la vida real de forma abstracta permitiendo decidir qué características se toman en cuenta y cuales se ignoran, logrando realizar simulaciones que optimizan el tiempo de diseño de nuevas tecnologías y también para poder determinar la mejor estrategia de control para este tipo de lámparas.

Existen diferentes alternativas para resolver el problema de resonancias acústicas en las lámparas de alta intensidad de descarga. Una de ellas es por medio de reglas de adaptación, la cual se basa en que el sistema sea capaz de acomodarse a modificaciones no predecibles del medio, sean esos cambios internos o externos al mismo.

Con base en lo anterior, el objetivo principal de este proyecto de tesis es realizar la caracterización e implementación de un controlador Fuzzy para una lámpara HID-MH el mismo que permitirá resolver el problema de resonancias acústicas para así obtener un funcionamiento óptimo de la lámpara y posteriormente se lo pueda emplear en iluminación de exteriores e interiores con el consecuente ahorro energético.

De esta forma, el presente documento se organizó de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se presenta la descripción del proyecto: como sus objetivos, alcance y los antecedentes que llevaron al desarrollo de dicho proyecto.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte en el cual, se toparan los conceptos básicos que se manejan en el campo de la iluminación y se describe el fenómeno de resonancias acústicas en lámparas de alta intensidad de descarga así como los tipos de convertidores que han sido empleados en el proyecto

En el capítulo 3 se presenta lo referente al control Fuzzy desde las generalidades hasta los métodos de control existentes para en base a ello escoger el controlador adecuado para la lámpara.

En el capítulo 4 se presenta la adquisición de datos de voltaje, corriente de la lámpara a fin de determinar el comportamiento del plasma y así realizar una comparación entre los datos del modelo simulado con los datos reales.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de este trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

Las lámparas de alta intensidad de descarga, HID por sus siglas en inglés, se caracterizan por tener una fuente de luz compacta. Los tres tipos de lámparas HID disponibles en el mercado ofrecen ventajas que las hacen ideales para numerosas aplicaciones. El uso de las lámparas HID es muy extenso, ya que estas se utilizan en iluminación de exteriores, alumbrado público, iluminación exterior de edificios, inmuebles de gran tamaño, centros comerciales, naves industriales, estadios; entre otras.(Tapia, 2011)El fenómeno de resonancias acústicas en lámparas de alta intensidad consiste básicamente en ondas de presión del gas de relleno, estas son ocasionadas por las variaciones en la potencia consumida en la lámpara. Estas ondas de presión deforman el

arco de descarga, el cual puede llegar a tocar el vidrio de la ampolla provocando puntos de calentamiento, que en la mayoría de los casos se rompen (Tapia, 2011).

Es bien conocido en la teoría de control que un modelo adecuado permite a su vez un diseño de un controlador confiable. Este es el caso de las lámparas de alta intensidad de descarga (HID) cuando son alimentadas por una fuente de tensión con formas de onda cuadradas.

Una forma efectiva para eliminar las resonancias acústicas en lámparas de HID es alimentarlas con formas de ondas cuadradas. La mayoría de los balastos electrónicos que alimentan con formas de ondas cuadradas a estas lámparas utilizan un control en lazo cerrado. Este control estabiliza la corriente en la lámpara. En este caso se utilizará un control Fuzzy implementado en un balastro electrónico. Así mismo estos balastos son robustos ante cambios en la tensión de entrada y ante la variación en los parámetros de los balastos y/o la lámpara (Tapia, 2011).

1.2. Justificación e Importancia

La energía eléctrica que se genera a nivel mundial es repartida para distintas aplicaciones, entre ellas la iluminación tanto en interiores como exteriores ocupando un 25 % de esta energía en la actualidad.

Existen distintos tipos de lámpara que se utilizan como fuentes de luz, las lámparas HID son unas de ellas, estas lámparas son usadas para cubrir diferentes requerimientos de iluminación gracias a su elevada eficacia luminosa, alto índice de reproducción de colores,

elevada temperatura de color y elevado tiempo de vida. Estas lámparas son usadas con un balastro electromagnético.

La implementación de un controlador Fuzzy para un balastro electrónico de una lámpara HID optimizará el desempeño y la vida útil de la misma, al igual que reducirá el efecto de resonancia acústica que se provoca en dicha lámpara. Se obtendrá una reducción en el ennegrecimiento del tubo, una mayor estabilidad del color y aumento de las horas de vida de la lámpara.

1.3. Alcance Del Proyecto

Se pretende diseñar e implementar un controlador Fuzzy, esto bajo la premisa de proveer una corriente constante, siendo la variable a manipular la tensión de la lámpara, con lo cual se busca obtener un control indirecto sobre la corriente de la misma. Al mantener la corriente de la lámpara constante se pretende eliminar la resonancia acústica, así como el mejoramiento de las especificaciones de la lámpara como son: el tiempo de vida, intensidad luminosa, eliminación del parpadeo o flicker, entre otras.

Otro resultado que se pretende obtener es la reducción en volumen y peso del balastro, al ser implementado electrónicamente, a más de obtener cierta inmunidad frente a las variaciones de la tensión de red, la que habitualmente produce un deterioro en los parámetros de la lámpara o su destrucción.

Las simulaciones y validaciones se realizarán en MATLAB y se entregará un prototipo funcional del balastro.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Diseñar e implementar un controlador Fuzzy para una lámpara HID-MH de 250W.

1.4.2. Específicos

- Implementar el balastro electrónico para controlar la potencia eléctrica de la lámpara.
- Establecer las reglas para la lógica Fuzzy, para facilitar el modelamiento y posterior análisis del sistema.
- Determinar las funciones de pertenencia, tanto para las entradas como para la salida.
- Controlar el comportamiento dinámico de la lámpara a través del diseño e implementación de un controlador Fuzzy, con el fin de evitar la resonancia acústica.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente por medio de simulaciones con los del modelo obtenido.

CAPÍTULO 2

LÁMPARAS DE ALTA INTENSIDAD

DE DESCARGA HID

La utilización de lámparas de alta intensidad de descarga se ha incrementado notablemente en los últimos años; sin embargo, el empleo de balastos electrónicos para este tipo de lámparas se ha visto limitado por el fenómeno de resonancias acústicas que se presenta al operar este tipo de lámparas en alta frecuencia.

En el capítulo se presentan los conceptos básicos que se manejan en el campo de la iluminación, se describe un panorama general sobre el problema de resonancias acústicas en lámparas de alta intensidad de descarga y se presenta el planteamiento del problema.

2.1. Conceptos Generales

Desde el punto de vista de la física, la luz se considera como la porción del espectro electromagnético comprendido entre los límites de longitud de onda de 380 a 770nm, éste recibe el nombre de espectro visible y dentro del cual está comprendido el conjunto de colores que puede ser observado por el ojo humano (Douriet, 2005).

La energía radiante de una longitud de onda apropiada hace visible todo aquello desde donde es emitida o reflejada en suficiente cantidad para activar los receptores en el ojo humano.

En esencia, la emisión de luz se debe a las transiciones de electrones de un nivel de energía mayor a uno menor. A través del tiempo el hombre ha desarrollado diferentes formas para generar energía luminosa, las cuales se han clasificado en dos grandes grupos dependiendo de la forma en que los electrones son excitados para lograr estas transiciones entre estados de energía: la incandescencia y la luminiscencia siendo esta última el grupo al cual se desarrollará en este trabajo debido a que es la empleada por las lámparas de descarga.

Luminiscencia

En este proceso la radiación luminosa emitida se genera por efecto de un agente exterior que excita los átomos del cuerpo químico. La excitación de los átomos se presenta solamente en ciertos niveles de energía y la luz se emite en un número limitado de longitudes de onda, lo que origina un espectro discontinuo. Las radiaciones luminiscentes dependen,

esencialmente, de la estructura atómica de los materiales y consiste en una radiación electromagnética visible, cuya intensidad en determinadas longitudes de onda (determinada por las características del material) es mucho mayor que la radiación térmica del mismo cuerpo a la misma temperatura.

Fotoluminiscencia

En este proceso la energía radiante se puede generar por medio de la descarga en un medio gaseoso y se produce por la acción de otras radiaciones de distinta longitud de onda.

Electroluminiscencia

Se produce por la acción de un campo eléctrico en el seno de un gas o material sólido. Cuando la descarga es a través de un gas, se aplica un potencial eléctrico que ioniza al gas y permite el paso de corriente eléctrica a través de él. Los electrones que forman el "arco de descarga" se aceleran a enormes velocidades y al entrar en colisión con los átomos del gas o vapor, alteran momentáneamente la estructura atómica de éste, produciéndose la luz por efecto de la energía desprendida cuando los átomos alterados vuelven a su estado normal. La forma en que realiza la excitación determina la distribución espectral emitida y, por consiguiente, la luz que se genera dependiendo de sus características es por ello que los siguientes conceptos ayudan a comprender las características de la luz que se producen por la luminiscencia.

Flujo Luminoso

El flujo luminoso describe la potencia luminosa total emitida por una fuente de luz y se la define como la potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su unidad es el lumen (lm). El flujo luminoso da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente en todas las direcciones del espacio.

Lámparas De Descarga

El desarrollo de las fuentes de luz no está encaminado sólo a mejorar las características de rendimiento y temperatura de color, sino también a introducir mejoras importantes en la eficacia; además de esto, no solo se busca mejorar estas características, sino también que se mantengan durante la mayor parte de su vida útil. Debido a su gran proliferación y a que han ganado aceptación en un gran número de aplicaciones, la utilización de lámparas de descarga es muy común en estos días. La tendencia en el desarrollo de estos sistemas de iluminación no solo consiste en el ahorro de energía y la reducción de costos eléctricos, sino también está encaminada a proporcionar una mayor satisfacción al usuario. Las lámparas de descarga producen luz aplicando una descarga eléctrica dentro de un gas, por lo que basan su funcionamiento en la electroluminiscencia, aunque también existen algunas que se basan en el efecto foto luminescente para generar luz visible. De acuerdo a la sociedad de ingenieros en iluminación las lámparas de descarga se clasifican en dos grandes grupos dependiendo de la presión del gas con que se llena el tubo de descarga. De esta forma existen las lámparas de descarga de baja presión y las lámparas de descarga de alta presión. La descarga a baja presión se presenta cuando la

presión en el tubo de descarga es menor a 1 Pa en tanto que en las lámparas de alta presión el proceso de descarga se realiza a una presión que se incrementa hasta valores superiores a 1.5×10^4 Pa con el objeto de aumentar la eficacia luminosa.(Douriet, 2005)

2.2. Lámparas De Alta Intensidad De Descarga (HID)

La estructura general de este tipo de lámparas se conforma de una ampolla exterior, un tubo de descarga, dos electrodos y un casquillo como se muestra en la figura 2.1. La ampolla contiene al tubo de descarga. En los extremos del tubo de descarga se ubican los electrodos. El interior del tubo de descarga contiene el gas de relleno a alta presión (0.98 bar). También, en un extremo de la ampolla se encuentra el casquillo por donde se conecta la lámpara a la fuente de energía eléctrica.(Hernández, 2007)

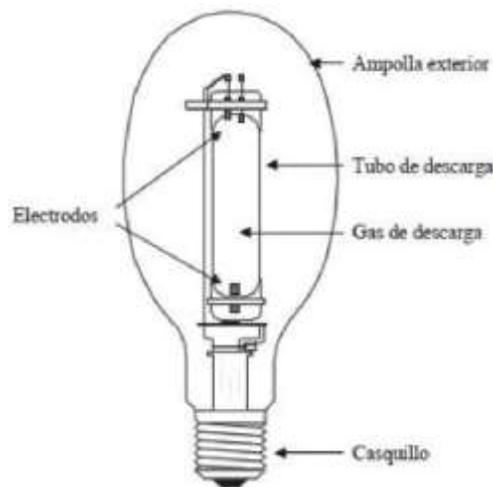


Figura 1: Estructura general de la lámpara HID.

Fuente: (Tapia, 2011)

Las lámparas HID se caracterizan por ser económicas y por su capacidad para producir luz extremadamente brillante, con dimensiones pequeñas. La luz se genera directamente mediante una descarga de arco eléctrico. La descarga eléctrica continua entre los dos electrodos de la lámpara hace que brille el gas durante la descarga.

2.2.1. Clasificación De Las Lámparas HID

Las lámparas HID se pueden clasificar según el gas de descarga utilizado:

- Vapor de sodio
- Vapor de mercurio
- Halogenuros metálicos

Las propiedades varían de unas a otras y esto las hace adecuadas para aplicaciones específicas.

La lámpara de vapor de sodio a alta presión contiene en el interior del tubo de descarga una amalgama de sodio y mercurio. Además, contiene un gas noble, como el xenón, que tiene la función de facilitar la ignición del arco de descarga. Cuando la lámpara alcanza su temperatura de operación, el mercurio permite incrementar la presión del gas, como consecuencia el nivel de voltaje de la lámpara aumenta y el valor de la corriente disminuye, para una potencia dada. El espectro de luz que produce el sodio se encuentra principalmente en el intervalo de luz visible por lo que no requiere de una cubierta fluorescente.

La lámpara de vapor de mercurio a alta presión contiene en el tubo de descarga vapor de mercurio. Se caracteriza por tener un electrodo de encendido que tiene como propósito facilitar el proceso de encendido a baja tensión. La luz que emite es de color azul verdoso, es decir, no contiene radiaciones de color rojo. Para mejorar las características cromáticas se cubre el interior de la pared del tubo de descarga con una capa de polvos fluorescentes que emiten luz de color rojo. De la composición de estas sustancias dependerán la cantidad, calidad de la luz y las cualidades cromáticas de la lámpara.

La lámpara de halogenuros metálicos como se puede ver en la figura 2.2 es una lámpara de vapor de mercurio a alta presión a la que se han incorporado halogenuros con el propósito de mejorar su rendimiento. Al añadir halogenuros metálicos se consigue mejorar considerablemente la capacidad de reproducir color. La desventaja es que aumenta considerablemente su tensión de arranque (1500 - 5000 V).(Hernández, 2007)

Los haluros metálicos que se utilizan con mayor frecuencia son talio, indio, escandio y disprosio, los cuales pueden mezclarse para obtener los tipos de combinaciones más utilizados en la fabricación de este tipo de lámparas, los cuales son: 1) sodio, talio y ioduros de indio, 2) sodio y ioduros de escandio y 3) disprosio y ioduros de talio. Con la incorporación de estos elementos se puede obtener una eficacia mayor (1.5 a 2 veces) a la obtenida en las lámparas de vapor de mercurio; además de lograr una mejora considerable en el balance de color de la luz generada.

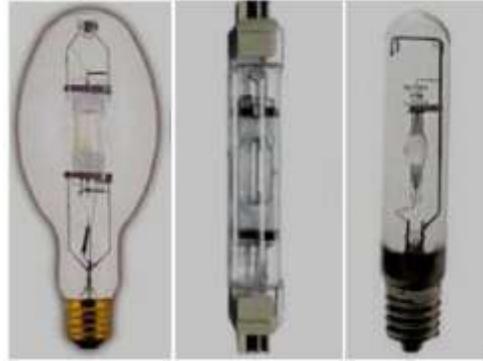


Figura 2: Lámparas de halogenuros metálicos.

Fuente: (Tapia, 2011)

Para el encendido de este tipo de lámparas es necesario aplicar pulsos de tensión comprendidos entre 1.5 y 5 kV. Debido a que este tipo de lámparas opera a temperaturas más elevadas requieren de hasta 15 minutos para poder enfriarse, por lo que el proceso de re-encendido no se logra de manera inmediata, a menos que se apliquen pulsos de alta tensión de 35 kV como mínimo para lograrlo.

2.2.2. Encendido De Lámparas De Alta Intensidad De Descarga

El principio de funcionamiento de las lámparas de descarga se basa en la forma en que ocurre la descarga en los gases. El proceso de encendido de una lámpara es el siguiente:

- Ruptura,
- Transición de luminiscencia, a arco
- Transición al arco termoiónico
- Arco termoiónico.(Gómez, 2004)

La intensidad de descarga se puede resumir en las siguientes etapas:

La fase de ruptura es la que inicia el proceso de descarga y para ello es necesario aplicar una tensión elevada a los electrodos de la lámpara con el fin de emitir electrones, los cuales se aceleran por efecto del campo eléctrico aplicado produciendo colisiones elásticas e inelásticas con los átomos y las moléculas del gas de llenado del tubo de descarga.

En las colisiones elásticas entre electrones y átomos se transfiere energía cinética incrementando así la temperatura del gas. Si el electrón tiene una velocidad muy alta al momento de la colisión con el átomo, éste último desprenderá un electrón de la órbita más externa.

Gran parte de la energía del electrón libre se transfiere al electrón desprendido causando que éste se mueva a un nivel energético superior; pero debido a que el núcleo atrae la energía absorbida, ésta se libera en forma de radiación electromagnética. En el caso de que el electrón se desprenda por completo del átomo (colisión inelástica) se forma un ión positivo; el cual puede generar más iones nuevos. Esta ionización es necesaria para que se genere una corriente eléctrica en la descarga. De esta manera, las colisiones elásticas son las que se encargan de aumentar la temperatura en el gas de llenado de la lámpara y las colisiones inelásticas producen la ionización de los átomos generando así radiación electromagnética.

Una vez que se presenta la descarga luminiscente, el proceso de descarga depende de la cantidad de energía presente en los cátodos de la lámpara e inicia el proceso de

transición de luminiscencia a arco. Durante esta fase, la cual se caracteriza por un voltaje elevado y una corriente en la lámpara baja, se emite una pequeña cantidad de luz y la impedancia de la lámpara permanece en un valor elevado. Los electrodos se calientan y, eventualmente, el mecanismo de emisión de electrones cambia de una emisión secundaria a un bombardeo de iones para la emisión termoiónica.

Posteriormente se presenta la etapa de transición al arco termoiónico en la cual predomina la emisión termoiónica de electrones y se caracteriza por un cambio en las formas de onda de corriente y voltaje; el voltaje y la impedancia de la lámpara disminuyen y la corriente a través de la lámpara se incrementa a medida de que ocurre la emisión termoiónica.

La fase del arco termoiónico, que sigue a la fase de transición de luminiscencia a arco, se caracteriza por una baja impedancia y un voltaje de lámpara bajos. El calentamiento del tubo de descarga provoca que ocurran cambios en la composición del gas. Durante esta fase, que puede durar algunos segundos, se observa un incremento considerable en la emisión de luz.

Finalmente, después de varios minutos de operación, se establece el arco de descarga en alta presión en el que la temperatura de operación y la luz de salida alcanzan un equilibrio.

La figura 3 muestra de manera gráfica la generación de luz visible durante el proceso de descarga en la lámpara HID

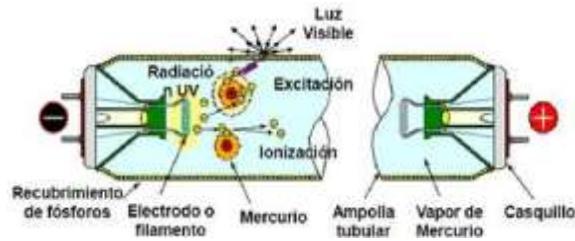


Figura 3: Proceso de descarga en lámpara HID.

Fuente: (Tapia, 2011)

De esta forma, para lograr el encendido de las lámparas de descarga es necesario satisfacer dos condiciones generales:

La primera es la aplicación de una tensión elevada para producir el rompimiento de tensión, la cual varía en función del tipo de lámpara y la temperatura del gas de llenado del tubo de descarga.

La segunda condición consiste en proporcionar la potencia necesaria a la lámpara para llegar a la transición de luminiscencia a arco; es decir, se debe generar la corriente necesaria para estabilizar el arco de descarga de la lámpara.

2.2.3. Proceso De Estabilización De La Lámpara HID

Una vez aplicados a los electrodos una tensión elevada y una potencia necesaria con el fin de lograr la transición luminiscencia-arco, la lámpara comienza a aumentar el flujo luminoso, en este punto se presenta el fenómeno llamado impedancia negativa, esto se presenta porque al incrementar la corriente a través de la lámpara también aumentará la temperatura en el arco de descarga esto último incrementa la

concentración de iones y electrones libres, lo que hace que el arco sea más conductivo (Tapia, 2011).

Esta conductividad en el arco aumenta lo suficiente como para que la tensión a través de él disminuya conforme la corriente se incrementa. Debido a este fenómeno la lámpara debe tener un circuito que limite la corriente que pasa a través de ella, si esto no se lleva a cabo la potencia tenderá a aumentar descontroladamente lo que provocaría la destrucción de la lámpara.

2.3. El Balastro

Es el circuito que tiene por objetivo controlar la corriente a través de la lámpara, y proporcionar la estabilización de la misma (ver figura 4).

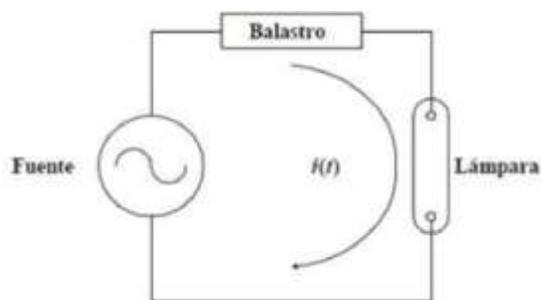


Figura 4: El balastro.

Fuente: (Tapia, 2011)

Ya que el balastro actúa como un tipo de interface entre la lámpara de descarga y la red de alimentación debe satisfacer ciertos requerimientos.

Con respecto a la lámpara de descarga, el balastro debe asegurar, entre otras cosas, lo siguiente:

- Proporcionar las condiciones apropiadas para el calentamiento, la ignición y la estabilización de la lámpara durante su vida útil.
- Mantener la potencia de lámpara cerca del valor nominal ante fluctuaciones en el voltaje de línea y en el voltaje de lámpara durante su vida útil.
- Incorporar protecciones para cuando se presente el final de la vida útil de la lámpara y cuando la lámpara se dañe o no esté conectada.

Con respecto a la red de alimentación, el balastro debe asegurar, entre otras cosas, lo siguiente:

- Mantener la distorsión de la corriente de alimentación dentro de los límites especificados, con el propósito de mantener un voltaje de alimentación sinusoidal sin distorsión.
- Cumplir con los requerimientos establecidos por las diferentes normas con respecto a los niveles de factor de potencia y distorsión armónica.(Gómez, 2004)

2.3.1. Clasificación De Balastros

Debido a que los balastros son vitales para la operación de las lámparas HID, éstos han tenido un importante desarrollo tecnológico. A través de la historia la mayoría de los balastros han sido electromagnéticos, pero en la actualidad los que ofrecen mejor rendimiento y ahorro eléctrico son los balastros electrónicos. (Tapia, 2011)

Balastro electromagnético

El balastro electromagnético consiste básicamente de un núcleo de láminas de acero rodeadas por dos bobinas de cobre o aluminio. Este arreglo transforma potencia eléctrica en una forma apropiada para arrancar y regular la corriente en la lámpara HID. El tercer componente principal de la mayoría de los balastros electromagnéticos es el capacitor.

El capacitor en dichos balastros optimiza el factor de potencia, de tal forma que puede utilizar la energía de manera más eficiente. Los balastros electromagnéticos son económicos, simples y confiables; pero tienen diversas desventajas, incluyendo un tamaño y peso considerables, bajo factor de potencia, baja eficiencia, regulación de potencia muy pobre; además, son muy sensibles a variaciones en el voltaje de línea y necesitan un ignitor de alto voltaje por separado para encender la lámpara.

Por otra parte presentan el fenómeno de reencendido en la lámpara cada vez que la corriente de lámpara cruza por cero en cada semiciclo de línea, esto se debe a la baja frecuencia de operación y causa que la vida útil de la lámpara disminuya debido a un desgaste excesivo de los electrodos. En la figura 6 se muestran las formas de onda de voltaje y corriente típicas en una lámpara HID operando a baja frecuencia con un balastro electromagnético. La forma de onda del voltaje de lámpara es una señal cuadrada y presenta picos en cada semiciclo de línea debido al reencendido de la lámpara. A diferencia del voltaje de lámpara, la corriente es una señal senoidal.

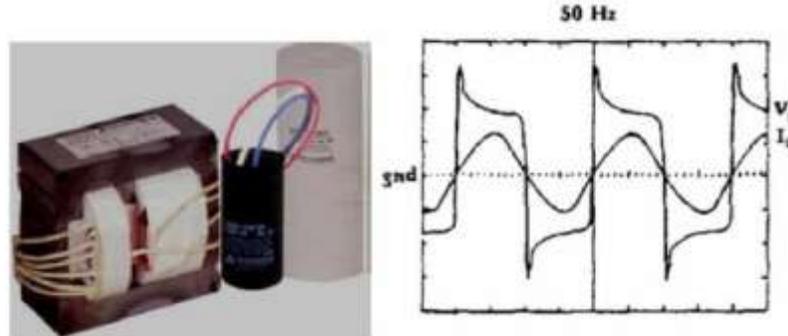


Figura 5: Formas de onda de voltaje y corriente en lámparas HID.

Fuente: (Tapia, 2011)

Balastro Electrónico

La revolución electrónica ha dado lugar a mejoras drásticas en el funcionamiento de los balastos. El balastro electrónico está basado en una tecnología enteramente diferente a la del balastro electromagnético. Enciende y regula las lámparas fluorescentes en altas frecuencias, generalmente mayores a 20kHz., usando componentes electrónicos en vez del tradicional transformador.

Con la operación a alta frecuencia se pueden eliminar los problemas de reencendido, como se aprecia en la figura 6, en la que el voltaje y la corriente de lámpara son señales casi sinusoidales y la lámpara se comporta como una resistencia; mientras que con la operación de pulsos de corriente se puede obtener una mayor temperatura de color que la obtenida con balastos convencionales.

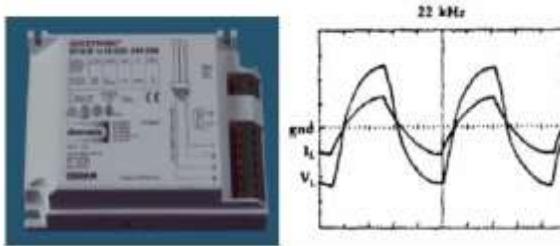


Figura 6: Formas de onda de voltaje y corriente en lámparas HID a alta frecuencia.

Fuente: (Tapia, 2011)

Un aspecto muy importante en la evolución que han tenido los balastos electrónicos dentro de las lámparas HID, son las ventajas que presentan con respecto a los balastos electromagnéticos tradicionales, tales como la eliminación del parpadeo de la lámpara en el encendido, el ruido audible, la habilidad para ajustar la salida de luz de la lámpara a casi cualquier nivel cuando es usado un control de intensidad luminosa.

2.3.2. Estructura del Balastro Electrónico

Los balastos son dispositivos diseñados para operar las lámparas HID y proveer el voltaje requerido apropiado para el arranque y operación de la lámpara. Los balastos electrónicos están compuestos de grupos de componentes electrónicos que convierten voltaje CA a CD, pasando por un convertidor CD-CD el cual funciona como corrector de factor de potencia. Posteriormente la salida se conecta a un inversor de alta frecuencia que alimenta la lámpara. En la figura 7 se muestra en cascada las dos etapas que forman al balastro electrónico.

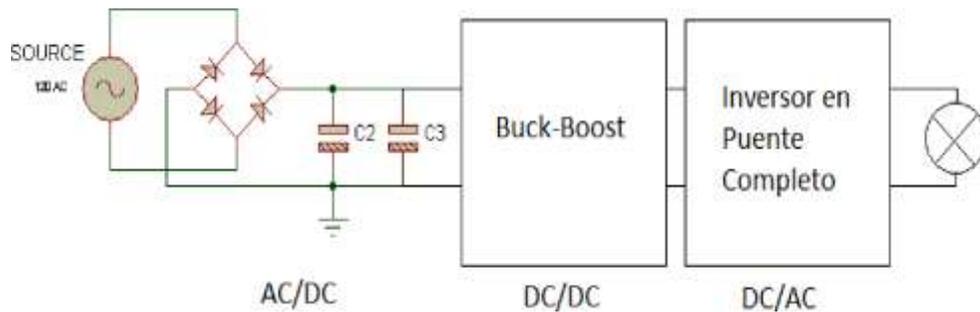


Figura 7: Etapas del balastro electrónico

Fuente: (Tapia, 2011)

2.4. El Fenómeno De Resonancias Acústicas

Las lámparas HID MH son eficientes tienen una larga vida útil proveen una luz de buena calidad y son de tamaño reducido sin embargo son susceptibles al fenómeno de las resonancias acústicas. Este fenómeno se presenta cuando existen modulaciones en la potencia de la lámpara con una determinada frecuencia a la cual se le conoce como frecuencia característica. Las modulaciones provocan la aparición de ondas de presión estacionarias dentro del gas de relleno esto da lugar a un crecimiento exagerado en la longitud del arco provocando un sobre voltaje en el balastro y una posible extinción del mismo así como también al movimiento del arco el cual puede ser violento dependiendo de la magnitud de las ondas estacionarias, Comúnmente esto produce fuertes fluctuaciones en la luz generada por la lámpara así como también en la temperatura esto puede producir que el arco toque la pared del tubo de descarga, provocando la extinción del arco, e incluso, la ruptura del tubo por un sobre calentamiento local.(Gómez, 2004)

2.4.1. Características

Las resonancias acústicas se caracterizan principalmente por lo siguiente:

- Varían por la tolerancia en la manufactura de la lámpara.
- Las frecuencias características para un mismo tipo de las lámparas varían aún para un mismo fabricante.
- Naturaleza impredecible y variable.
- Representan el mayor obstáculo para que el funcionamiento de las lámparas de alta intensidad de descarga sea confiable en alta frecuencia.

2.4.2. Tipo de resonancias acústicas

Por la forma en que el arco de descarga se deforma las resonancias acústicas pueden ser de los siguientes tipos (ver figura 8):

- Acimutales.
- Transversales.
- Longitudinales.
- Combinaciones entre ellas.(Tapia, 2011)

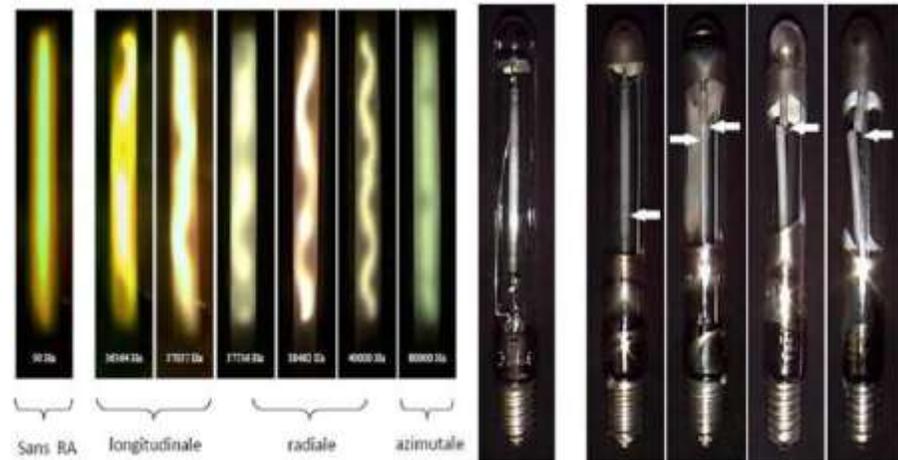


Figura 8: Tipos de deformación del arco de descarga debido a la resonancia acústica y consecuencias en las lámparas.

Fuente: (Tapia, 2011)

Existen diferentes modos en los que se presentan las resonancias acústicas, además las frecuencias y formas en que se presentan varían de lámpara en lámpara por ejemplo en la figura 9, se muestra la distribución de bandas en una lámpara de vapor de sodio de alta presión cuando la frecuencia de una corriente de lámpara sinodal se incrementa de 50Hz a 150kHz.

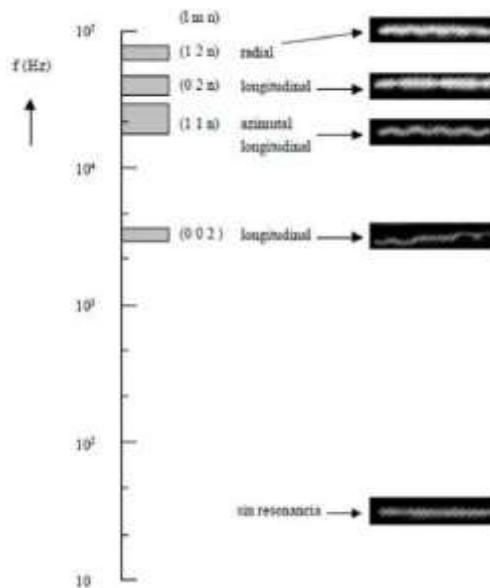


Figura 9: Resonancias acústicas en una lámpara HID de 250 w

Fuente: (Tapia, 2011)

Fuera de estas bandas la descarga tiene la misma apariencia que al ser operadas a 50 Hz.

La diferencia más notable entre varios tipos de lámparas es que las frecuencias características a las que se presenta el fenómeno de resonancia acústica pueden estar desplazadas a otras bandas de frecuencia debido a la diferencia en las dimensiones del tubo de descarga y de la presión del gas de llenado del mismo.

Por ejemplo en la figura 10 se muestra la distribución de las bandas en los tres tipos de lámparas de alta intensidad de descarga. En ella se observa que la lámpara de halogenuros metálicos es más propensa a la aparición de este fenómeno, en caso contrario, para lámparas de vapor de sodio de alta presión aparecen bandas de frecuencias más angostas en donde se puede generarse este problema. (Márquez, 2003)

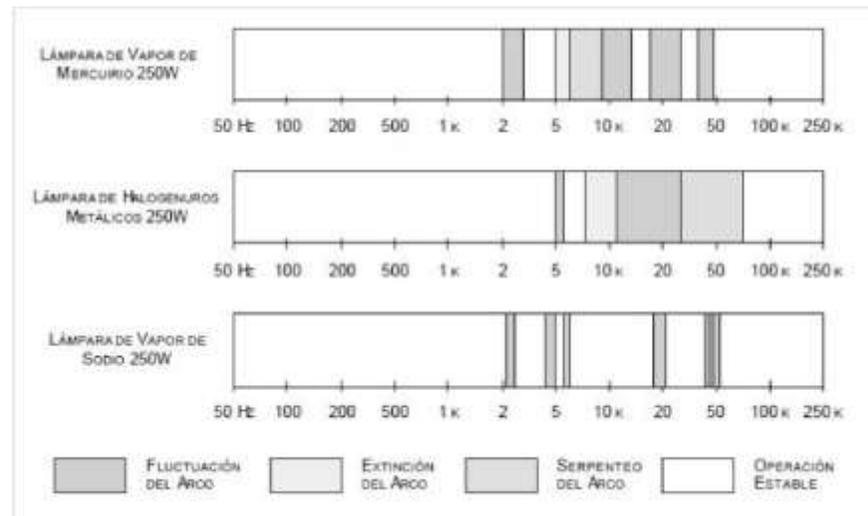


Figura 10: Localización de resonancias acústicas en diferentes lámparas de alta intensidad de descarga

Fuente: (Tapia, 2011)

En la Figura 11 literal a) se puede observar la trayectoria del arco de descarga para una lámpara de halógenos metálicos durante una operación estable y en b) se pueda apreciar la deformación causada por el efecto de las resonancias acústicas.

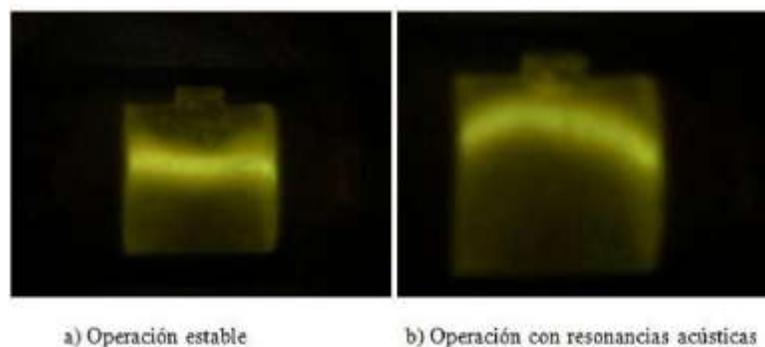


Figura 11: Arco de descarga de una lámpara de halógenos metálicos.

Fuente: (Tapia, 2011)

En conclusión los parámetros que determinan las frecuencias características de una lámpara HID dependen, de manera general, de la geometría de la bóveda en la que ocurre la descarga del gas, de la temperatura, presión y del propio gas de llenado; del envejecimiento de la lámpara e, incluso, de la posición en que la lámpara estará funcionando. Debido a esto y, por su naturaleza, “el fenómeno de resonancias acústicas en las lámparas HID es impredecible” (Tapia, 2011), pues depende en gran medida de las tolerancias en la fabricación y de las condiciones de operación de la lámpara.

2.5. Lógica Fuzzy

2.5.1. Antecedentes de los Conjuntos Difusos

Si bien los conjuntos borrosos (difusos o fuzzy) hicieron su aparición en 1965 de la mano de Lotfi A. Zadeh con el fin de representar información y datos imprecisos cabe destacar que la lógica difusa surgió años atrás.

Las Leyes del Pensamiento de Aristóteles permitieron el desarrollo de la lógica y de las matemáticas. La Ley del Tercero Excluido establece que cualquier proposición solo puede ser Verdadera o Falsa y que ningún otro valor de verdad intermedio está permitido. Parménides (300 A.C.) al proponer la primera versión de esta ley encontró serias e inmediatas objeciones. Heráclito propuso cosas que podían ser simultáneamente ciertas y falsas. Pero sería Platón quien colocara la “primera piedra” de la Lógica Difusa señalando que “hay una tercera región entre lo verdadero y lo falso donde los opuestos se presentan juntos”.(Kevin M. Passino, 1998)

En el siglo XVIII, el filósofo inglés David Hume habló de la lógica del sentido común” razonamiento basado en la experiencia que la gente comúnmente adquiere de sus vivencias por el mundo”.(Kevin M. Passino, 1998)

Entre 1917 y 1920 J. Lukasiewicz presenta la primera formulación sistemática de una alternativa a la lógica bivaluada de Aristóteles. Esta lógica trivaluada describe al término "posible" como un tercer valor de verdad, asignando un valor numérico entre 0 y 1, y proponiendo sus respectivas matemáticas. Lukasiewicz planteó una notación completa y un sistema axiomático a partir de los cuales esperaba derivar "matemática moderna".(Kevin M. Passino, 1998). Más tarde exploró lógicas poli valoradas determinando que no existía impedimento para una lógica infinito valorado, lo cual formalizó hacia 1930. El soviético Lofti Zadeh, actualmente catedrático e investigador en la Universidad de California Berkeley, hizo la presentación por primera vez (1965) de un trabajo sobre Conjuntos Borrosos.

Los fenómenos del mundo real son muy complejos. La complejidad al tratar de estudiarlos y explicarlos en toda su extensión, se presenta en la forma de incertidumbre y ambigüedad. El ser humano ha tenido que desarrollarse en medio de este tipo de fenómenos durante todo el transcurso de su historia, aun así, las computadoras diseñadas por él no son capaces de manejar la complejidad y ambigüedad. Esto ha podido ser explicado por la capacidad que tiene el ser humano para razonar aproximadamente, y las computadoras aún no la tienen. Cuando razonamos acerca de un sistema complejo, explicamos su comportamiento aproximadamente, y mantenemos un entendimiento

general acerca del problema. Esta generalización, con todo y ambigüedad, es suficiente para que comprendamos los sistemas complejos.(Kevin M. Passino, 1998)

A inicios de los setenta, la lógica difusa se planteaba muy fuerte. Zadeh formula las bases del razonamiento aproximado a partir de 1971, posteriormente introduce los modificadores lingüísticos, las variables lingüísticas para la representación de la información difusa, obteniendo la regla composicional de inferencia que instaura los criterios para realizar inferencia en entornos de vaguedad e incertidumbre.(Kevin M. Passino, 1998)

En 1974 Ebrahim Mamdani junto con S. Asilian demuestran la aplicabilidad de la lógica Fuzzy al control de procesos, abriendo un área de aplicaciones de tremendas proporciones. Zadeh pronto pasó de la inferencia difusa a los sistemas expertos y de ello, al razonamiento aproximado. En los ochenta ya existían grandes escuelas de investigadores y tecnólogos, así como innumerables grupos de investigación universitaria, especialmente en Japón, Estados Unidos, Alemania, España y Francia, Lotfi Zadeh a mediados de esta década establece las reglas del razonamiento silogístico borroso y el razonamiento que él mismo denominó del "sentido común" . Velozmente la lógica difusa empezó a ser usada en diferentes aplicaciones prácticas, alcanzando su máximo apogeo a principios de los años 90, y extendiéndose hasta la época actual. (Senen Barro Ameneiro, 2002)

Complejidad en el Mundo Real

La complejidad de un sistema decrece conforme aprendemos más acerca de él. Al decrecer la complejidad se obtiene mayor precisión en el modelado del sistema.

Es así como podemos relacionar el grado de complejidad de un sistema con la precisión de los modelos del sistema ver figura 12

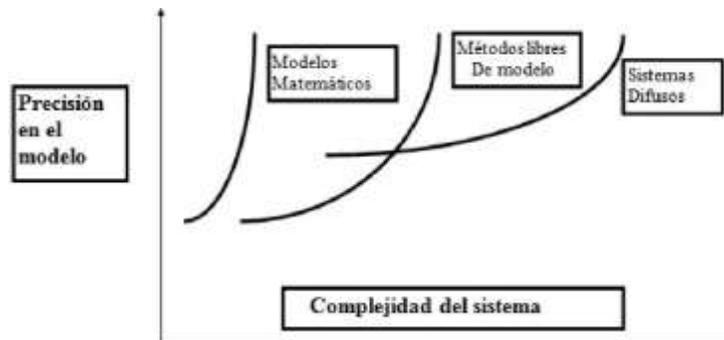


Figura 12: Complejidad contra precisión de un sistema

Fuente: (Tapia, 2011)

Por ello, para sistemas con poca complejidad, o poca incertidumbre, los modelos matemáticos pueden describirlos precisamente. En los modelos con un poco más de complejidad, pero que cuentan con datos significantes, la incertidumbre puede ser reducida utilizando métodos libres de modelo como las redes neurales artificiales, a través de su capacidad de aprendizaje a partir de patrones presentes en los datos disponibles. Para los sistemas más complejos donde existen pocos datos numéricos disponibles, el razonamiento difuso ofrece una alternativa robusta para entender el comportamiento del

sistema al permitir la interpolación aproximada entre las situaciones de entrada y salida observadas.(Piña, 2009).

2.5.2. Fundamentos

Conjuntos no difusos y difusos

La teoría de conjuntos clásica establece que todos los elementos son miembros de un conjunto, es decir que solo puede tomar un valor lógico verdadero o falso, alto o bajo, prendido o apagado, cerrado o abierto, en definitiva 1 ó 0, a estos conjuntos se los conoce como conjuntos no difusos. Por ejemplo con referencia al tipo de conjuntos no difusos una puerta sólo tiene dos posibilidades, está abierta o cerrada.

Por otro lado la lógica difusa permite valores intermedios que simulan de mejor manera el pensamiento humano. Los seres humanos emplean conceptos que tienen una transición gradual a su significado opuesto, por lo cual en el anterior ejemplo dentro de un conjunto difuso dicha puerta no tiene por qué esta necesariamente abierta (valor 1) ni cerrada (valor 0), sino que además puede estar abierta a medias (valor 0.5), bastante abierta (valor 0.8), casi cerrada (0.1),etc.

Función de Pertenencia

Es aquella aplicación que asocia a cada elemento de un conjunto difuso, el grado con que pertenece al valor lingüístico asociado. Siguiendo patrones de razonamiento similares a los del pensamiento humano

Tipos de Funciones de Pertenencia

Existen diferentes tipos de funciones de pertenencia (función gamma, función sigma, función trapezoidal, función gaussiana), para propósitos prácticos, funciones triangular y trapezoidal son las estándar. Ellas pueden ser descritas con 3 o 4 puntos y por lo tanto no causan mucho gasto computacional. (Senen Barro Ameneiro, 2002)

Función Triangular

Definida mediante el límite inferior a , el superior b y el valor modal m , tal que $a < m < b$. La función no tiene porqué ser simétrica.

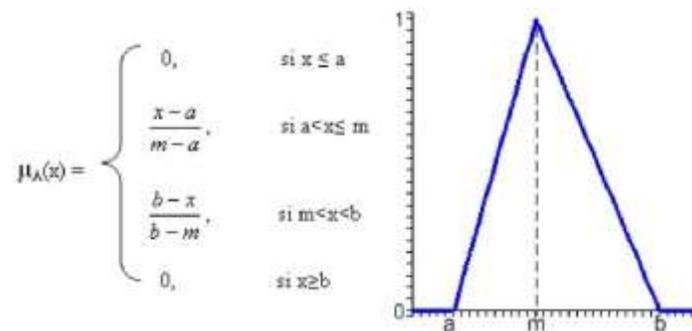


Figura 13: Función de pertenencia triangular.

Fuente: (Gómez, 2004)

Función Trapezoidal

Definida por sus límites inferior a , superior d , y los límites de soporte inferior b y superior c , tal que $a < m < b < d$. En este caso, si los valores de b y c son iguales, se obtiene una función triangular

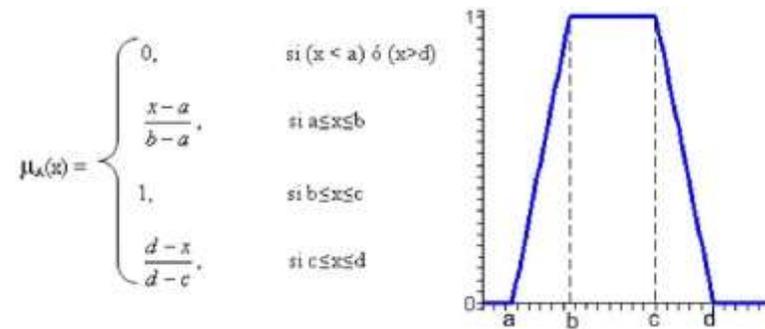


Figura 14: Función de pertenencia trapezoidal

Fuente: (Gómez, 2004)

Función Gamma

Definida por su límite inferior a y el valor $k > 0$. Esta función se caracteriza por un rápido crecimiento a partir de a ; cuanto mayor es el valor de k , el crecimiento es más rápido

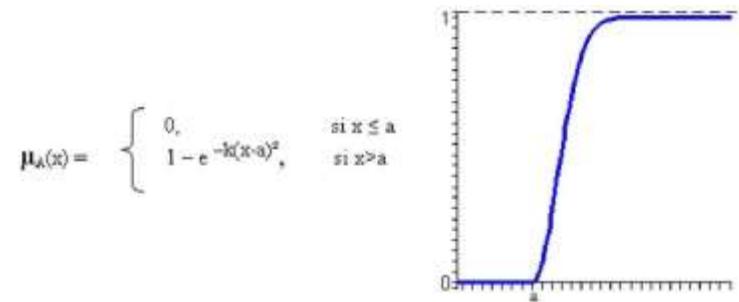


Figura 15: Función de pertenencia gamma

Fuente: (Gómez, 2004)

Función Sigmoidal

Definida por sus límites inferior a , superior b y el valor m o punto de inflexión, tales que $a < m < b$. El crecimiento es más lento cuanto mayor sea la distancia a b .

Para el caso concreto de $m * \frac{a+b}{2}$, que es lo usual, se obtiene la siguiente gráfica

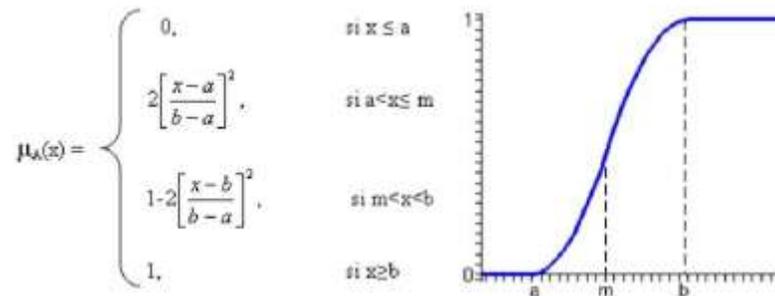


Figura 16: Función de pertenencia gamma

Fuente: (Gómez, 2004)

Operaciones entre Conjuntos Difusos

Los Conjuntos difusos operan entre sí del mismo modo que los conjuntos clásicos. Ya que los primeros son una generalización de los segundos, es dable definir las operaciones de unión, intersección y complemento haciendo uso de las mismas funciones de pertenencia: (Senen Barro Ameneiro, 2002) sean $u_{A(x)}$ y $u_{B(x)}$ las funciones de pertenencia correspondientes a los conjuntos difusos A y B, como se indica en la figuras. 17. respectivamente.

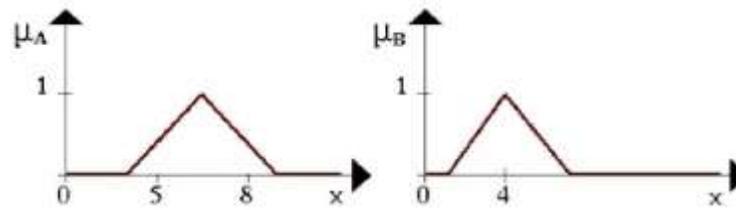


Figura 17: Conjuntos

Fuente: (Gómez, 2004)

Zadeh propone:

Unión u OR: $u_{A \cup B}(x) = \max(u_A(x), u_B(x))$. Ver figura 18.

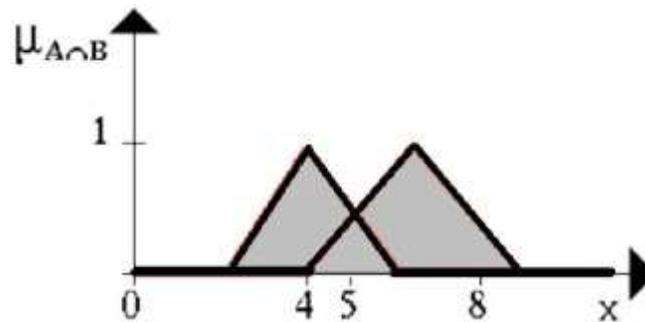


Figura 18: Unión de conjuntos

Fuente: (Gómez, 2004)

Intersección o AND: $u_{A \cap B}(x) = \min(u_A(x), u_B(x))$. Ver figura 19.

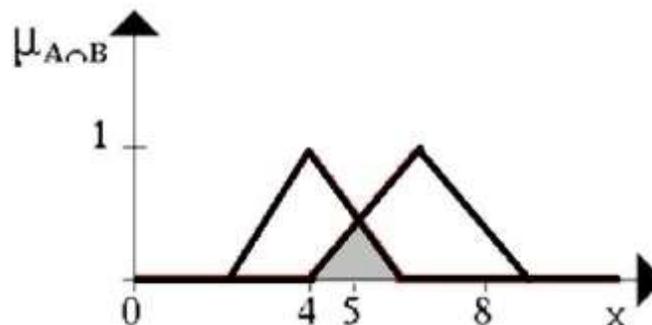


Figura 19: Intersección de conjuntos

Fuente: (Gómez, 2004)

Complemento o NOT: $u_{A(x)} = 1 - u_{A(x)}$ Ver figura20.

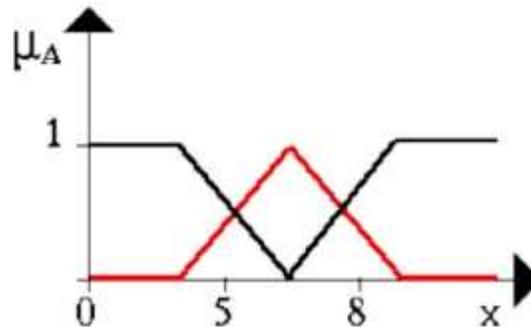


Figura 20: Complemento de conjuntos

Fuente: (Gómez, 2004)

2.5.3. Control Difuso

Características del Control Difuso

Entre sus principales características están:

1. El control difuso es lógico. El denominador de lógico significa que el algoritmo de control utiliza expresiones IF-THEN, con las que se pueden mencionar muchas condiciones, combinando expresiones lógicas con IF y AND.
2. El control difuso es disperso. Esta característica, que diferencia básicamente los sistemas de control difuso de los sistemas de control basados en una sola ecuación, admite la coexistencia de controladores con lógicas distintas y su actuación en paralelo.
3. El control difuso es lingüístico. Permite el uso de variables lingüísticas imprecisas, en particular en los antecedentes de las reglas. Dicho lenguaje cualitativo es fácil de entender, permite efectuar el control por medio de un diálogo con los operadores, usando sus ojos

experimentados en la observación del proceso como entradas externas, e introducir variables como las condiciones del proceso a modo de información útil para el control. Asimismo el algoritmo de control puede contener los procedimientos inusuales que hay siempre en las operaciones de un proceso real.

4. Función de un Sistema de Control Difuso

Esencialmente un sistema de control difuso, es una estructura basada en conocimiento, definida a través de un conjunto de reglas difusas del tipo si-entonces, las cuales contienen una cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística del experto de cómo realizar un control adecuado.

La información se procesa difusamente en la forma de reglas, tal como: SI valor de entrada "buena presión", ENTONCES valor de salida "hacer nada", o SI valor de entrada "medio", ENTONCES hacer valor de salida "pequeño". "Los valores de entrada y salida son variables lingüísticas y los términos "medio" y "pequeño" no son valores numéricos pero si valores lingüísticos.

"Ellos son también llamados conjuntos difusos. Una variable lingüística usualmente posee 3, 5 o 7 valores lingüísticos. La colección completa de las reglas forma la regla base".(Piña, 2009) .

No obstante, el sistema difuso es, forzosamente, parte de un sistema técnico-que trabaja con valores numéricos (señales), con valores no difusos, en sus entradas y salidas, por lo cual existen dos tipos de sistemas difusos:

Sistema de control difuso de Takagi-Sugeno: Sus entradas y salidas son variables con valores reales.

Sistema de control difuso de Mamdani: Interpone un fusificador en la entrada y un defusificador en la salida.

Sistema de control difuso de Mamdani

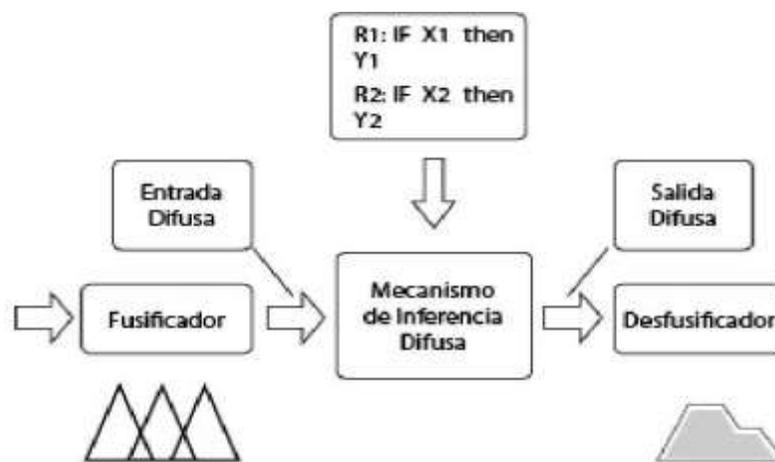


Figura 21: Complemento de conjuntos

Fuente: (Kevin M. Passino, 1998)

En sistema de control difuso de Mamdani está compuesto por:

Fusificación.

Los grados de satisfacción para los valores lingüísticos (grados de pertenencia del conjunto difuso) de las variables lingüísticas son fijados a los valores de entrada no difusos. Tal fusificación determina, por ejemplo, a que grado la "presión es buena si esta es, digamos, 115 bares. Esto se hace usando la función de pertenencia. Este grado es llamado "grado de satisfacción o cumplimiento de la parte SI. (Senen Barro Ameneiro, 2002)

Inferencia.

Para cada regla de la regla base, el grado de satisfacción de la parte ENTONCES es formado desde el grado de satisfacción de la parte SI por un cierto método. Este proceso es llamado también Implicación. El grado de satisfacción de la parte entonces es equivalente al grado de satisfacción de la regla, la cual es llamada también intensidad de la regla. Todas estas evaluaciones de reglas individuales puestas juntas resultan en una función de pertenencia para la señal de salida, la cual es también llamada composición (Senen Barro Ameneiro, 2002)

El resultado de la función de pertenencia describe un "comando de control-difuso que podría, por ejemplo, ser algo como "válvula de posición solo por-debajo del centro. Cuando la parte SI contiene una declaración combinada "SI...Y... ENTONCES", la operación Y de la lógica difusa es ejecutada primero y el grado de satisfacción es usado en la evaluación de la regla total. Todas estas declaraciones juntas son a menudo llamadas una agregación. La elección del operador de implicación condiciona la elección del operador de agregación, la tabla. 2.1 indica el tipo de implicación con su respectiva agregación:

Tabla 1: Interpretación de la agregación bajo varias implicaciones

Fuente: (Kevin M. Passino, 1998)

Implicación	Agregación
Zadeh Max-Min	$y(\wedge)$
Mansani Min	$0(V)$
Larsen Producto	$0(V)$
Aritmética	$y(\wedge)$
Booleana	$y(\wedge)$
Producto Obligado	$0(V)$
Secuencia Estándar	$y(\wedge)$
Gougen	$y(\wedge)$

Defusificación.

El valor de salida numérico (no difusa) más representativo es calculado para la variable de control desde el comando de control difuso (en la forma de la función de pertenencia resultante) (Senen Barro Ameneiro, 2002)

Las técnicas de defusificación más usadas son:

- Centroide o Centro de las Areas (COA o Center of Áreas)
- Centro de las Sumas (COS o Center of Sums)
- Media de los Máximos (MOM o Mean of Maxima)
- Promedio de los Centros (CA o Center Average)

Aplicaciones del Control Difuso

El control difuso es aplicado en procesos complejos, en casos en los que no hay un modelo matemático simple. En procesos no lineales, o cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras. Es aplicable si se puede expresar lingüísticamente el conocimiento experto. Permite el procesamiento de información a través de algoritmos expresados verbalmente en forma de la regla SI-ENTONCES.

Por ejemplo en procesos de manufactura complicados los operadores expertos toman acciones de control usando el criterio de si-entonces obteniendo una buena operación con resultados de calidad.

No solo controla procesos en lazo cerrado y en lazo abierto, el control difuso es usado también para el procesamiento de información en la adquisición de valores

(señales) y en el manejo y planeamiento (programación y predicción) de operaciones. Hace posible transmitir la experiencia de un experto a una computadora, logrando una solución inicial y automatizada rápidamente. En general, cuando se quiera representar y operar conceptos que tengan imprecisión no incertidumbre.

En la actualidad se puede encontrar todo tipo de instrumentos, máquinas y procedimientos controlados difusamente, adecuándose "inteligentemente" a cada situación particular: acondicionadores de aire, frigoríficos, lavadoras/secadoras, aspiradoras, hornos microondas, mantas eléctricas, ventiladores, autoenfoques fotográficos, estabilizadores de imágenes en grabadoras de vídeo, transmisiones de automóviles, suspensiones activas, controles de ascensores, dispensadores de anticongelantes para los aviones en los aeropuertos, sistemas de toma de decisiones industriales o económicas, entre muchas otras aplicaciones

Ventajas y Desventajas del Control Difuso

La ventaja primordial es la falta de expresiones matemáticas, tales como ecuaciones algebraicas o ecuaciones diferenciales etc., que describan el proceso a ser automatizado. El manejo de términos lingüísticos como a medias, bastante, casi poco, mucho, algo, etc. permite plantear el problema en las mismas expresiones en las que lo haría un experto humano, facilitando así el diseño y uso de sistemas difusos.

Por no usar un modelo matemático es también una fuente de incertidumbre, pues los muchos grados de libertad en el diseño de sistemas de control difusos puede ser una desventaja especial.

Entre sus ventajas se menciona:

- Fácil ejecución de reglas expresadas verbalmente (si...,entonces...) sobre un computador para resolver un problema.
- El comportamiento de un sistema difuso es entendible para los seres humanos.
- En comparación con otros métodos, evita el costoso desarrollo de una descripción matemática.
- El control difuso cubre un amplio rango de parámetros del sistema y puede afrontar la mayoría de las perturbaciones

Algunas de sus desventajas son:

- La definición de tareas sin suficiente conocimiento del sistema y poco o muy impreciso conocimiento del comportamiento del sistema resultan en malas, posiblemente inutilizables, soluciones difusas.
- Usualmente no posee capacidad de adaptabilidad y aprendizaje si el comportamiento del sistema cambia.
- El diseño de un sistema de control difuso requiere experiencia debido a los muchos grados de libertad.
- Aún no están bien formalizadas las características necesarias para que el control difuso sea robusto y estable

2.6. Buck-Boost

2.6.1. Sistemas de estructura variable

Los sistemas de estructura variable constituyen unos de los sistemas más complejos de controlar y de simular, dada su naturaleza no lineal y multivariable, y su carácter distribuido; presentan una característica especial, la dinámica de estos sistemas cambian con el tiempo y adoptan estructuras diferentes según el valor de entrada de control. La causa de estos cambios bruscos puede ser una acción voluntaria por parte del operador, el cambio de los valores temporales de ciertos parámetros del sistema, o la activación automática de uno o más interruptores presentes en el sistema, siendo este último el caso asociado al convertidor Buck Boost, un sistema de estructura variable tiene la forma $\dot{X} = f(x) + g(x) * u$ donde u solo puede tomar valores de 1 o 0.

2.6.2. Modelamiento Matemático

El Buck-Boost (Reductor-Elevador) es un conversor CA/CD que es una combinación en cascada con Buck seguido de un Boost, donde solo se utiliza un solo inductor. El sistema permite entregar a su salida una tensión mayor o menor a la suministrada, la polaridad de salida del convertidor puede ser negativa o positiva según su configuración, para este caso se trabaja con la configuración no invertida ver figura:

23

El principio de funcionamiento de un Buck-Boost está basado en la conmutación de sus elementos, que según la necesidad de la carga puede funcionar como reductor o

elevador .la señal de control es la conmutación de los interruptores a una frecuencia fija o variable, ya sean estos transistores o Mosfets. Para que un Buck-Boost funcione como reductor su ciclo de trabajo debe ser menor al 50 % y para que trabaje como un elevador su ciclo de trabajo debe ser mayor al 50 % variando solamente el ciclo de trabajo se puede controlar la Tensión o la corriente de salida.

La corriente de entrada de un Buck-Boost es discontinua o pulsante debido a que Q_1 y Q_2 solo conduce durante una porción del ciclo de trabajo, mientras el capacitor de salida $C1$ suministra a la carga por el resto del ciclo. Para el análisis el Buck-Boost se divide en dos estados cuando Q_1, Q_2 están en conducción ON ver figura:2.24 y Q_1, Q_2 no están conducción OFF ver figura:25 .

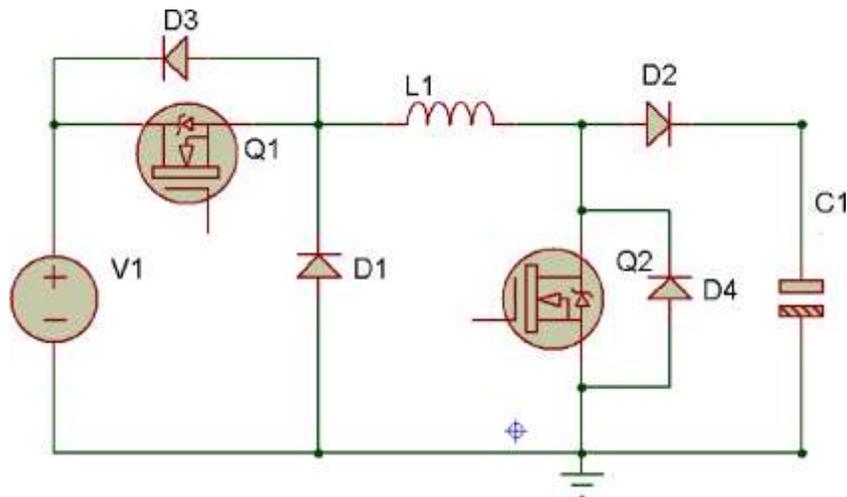


Figura 22: Buck-Boost no invertido

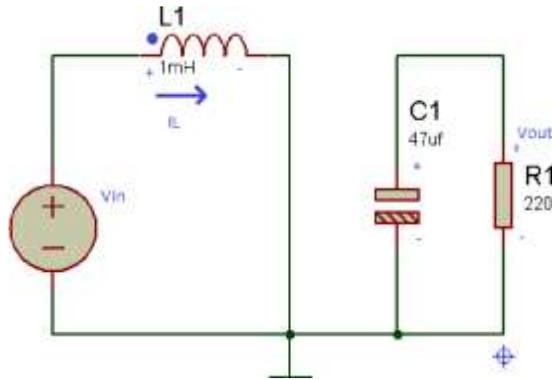


Figura 23: Buck-Boost Q1 y Q2 ON.

Cuando Q_1 , Q_2 están en conducción la tensión de entrada induce una corriente a la bobina L1, lo que le permite almacenar energía a la bobina, mientras el capacitor está suministrando energía a la carga.

La Corriente de la bobina está dada por la siguiente ecuación: $V_{in} = L \frac{d}{dt} iL(t)$ al despejar la ecuación tenemos la siguiente expresión.

$$\frac{d}{dt} iL = \frac{V_{in}}{L} \quad (2.1)$$

El voltaje del capacitor está dado por la siguiente ecuación

$$V_{out} = -c \frac{d}{dt} V_C(t) * R$$

Debido a que el capacitor está entregando energía a la carga se utiliza el signo menos despejando la ecuación se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{d}{dt} V_{out} = \frac{V_{out}}{R * C} \quad (2.2)$$

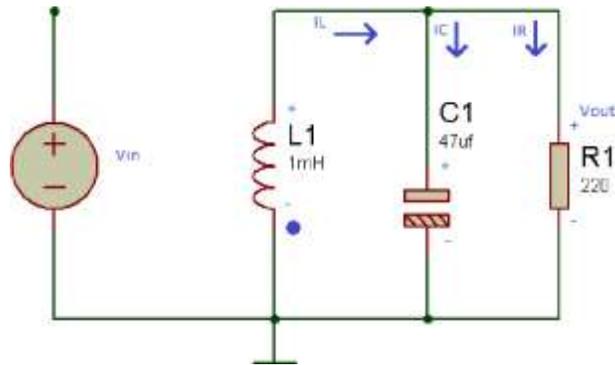


Figura 24: Buck-Boost Q1 y Q2 OFF.

Cuando Q_1, Q_2 no están en conducción la tensión de entrada se desconecta del resto del circuito mientras, la bobina L1 entrega energía al capacitor C1 y a la carga R1.

La Corriente de la bobina está dado por la siguiente ecuación $V_{out} = L \frac{d}{dt} I_L$ al despejar .

$$\frac{d}{dt} I_L = \frac{V_{out}}{L} \quad (2.3)$$

El voltaje del capacitor está dado por el siguiente nodo $I_L = I_C + I_R$ al remplazar $I_R = \frac{V_{out}}{R}$ y $I_C = C \frac{d}{dt} V_{out}$ tenemos la siguiente expresión.

$$\frac{d}{dt} V_{out} = \frac{I_L}{C} - \frac{V_{out}}{R*C} \quad (2.4)$$

EL modelo matemático del Buck-Boost será representado por espacio de estados, para lo mencionado se debe expresar de forma matricial $\dot{X} = A1 * X + B1 * U$ y $Y = C1 *$

X, una vez obtenidas las ecuaciones diferenciales se realiza un cambio de variable en las ecuaciones, $X = I_L$ y $Y = V_{out}$.

Cuando Q_1 y Q_2 ON

$$\dot{X}1 = \frac{1}{L} * V_{in} \quad (2.5)$$

$$\dot{Y}1 = Y1 * -\frac{1}{R * C} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}1 \\ \dot{Y}1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R * C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X1 \\ Y1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} * V_{in} \quad (2.7)$$

$$Y1 = [0 \quad 1] * \begin{bmatrix} X1 \\ Y1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Cuando Q_1 y Q_2 OFF

$$\dot{X}2 = \frac{1}{L} * V_{in} \quad (2.9)$$

$$\dot{Y}2 = \frac{1}{C} * X2 - \frac{1}{R * C} * Y2 \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}2 \\ \dot{Y}2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R * C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X2 \\ Y2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} * V_{in} \quad (2.11)$$

$$Y2 = [0 \quad 1] * \begin{bmatrix} X2 \\ Y2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

El comportamiento real del Buck-Boost, se puede aproximar por un modelo promediado en el espacio de estados, cuando el periodo de conmutación es constante y

mucho menor que las constantes de tiempo en cada modo de operación, el promedio permite encontrar un modelo continuo que aproxima la evolución de las variables de estado en cada uno de los intervalos de conmutación. (Sanfelin, 1998)

En el caso de la dinámica de las ecuaciones descritas por (2.7) y (2.11), si el interruptor está abierto será expresado como D y cuando está cerrado (1-D).

$$\dot{X} = [A1 * D + A2 * (1 - D)] + [B1 * D + B2(1 - D)] \quad (2.13)$$

$$Y=[C1*D+C2*(1-D)] \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (1 - D) * \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C}(1 - D) & -\frac{1}{R*C} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} * V_{in} \quad (2.15)$$

$$Y = [0 \quad 1] * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.6.3. Operación En Modo Continuo.

El Buck-Boost puede operar en modo continuo y discontinuo, el modo continuo es caracterizado porque siempre existe un flujo continuo de corriente en todo el ciclo de conmutación .El modo discontinuo es caracterizado porque la corriente llega a ser cero en una porción del ciclo de conmutación, para los convertidores es deseado siempre trabajar en modo continuo debido a que hay menos pérdidas y mayor transferencia de energía hacia la carga.

En el modo continuo de conducción se divide en dos etapas:

Cuando Q_1 , Q_2 están activados ON y D1, D2 están en OFF, el otro estado es cuando Q_1 , Q_2 están apagados OFF y D1, D2 están en ON, cuando se encuentra Q_1 , Q_2 ON el tiempo de duración será igual $D \cdot T = T_{on}$ donde D es el ciclo de trabajo proporcionado por el circuito de control mientras T es el periodo, para el caso de Q_1 , Q_2 OFF el tiempo de duración será igual a $(1-D) \cdot T$ a continuación se muestra las formas de onda en voltaje y corriente.

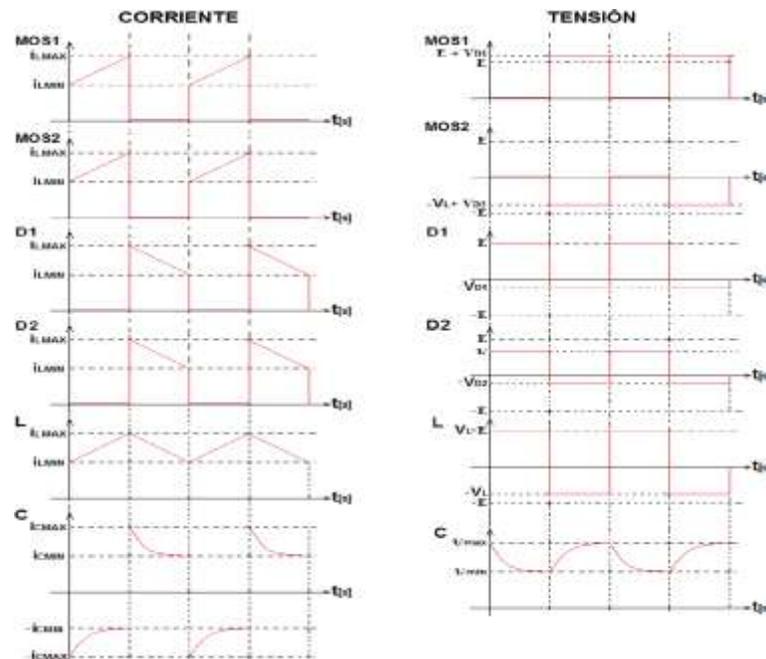


Figura 25: Formas de onda del Buck-Boost.

La cantidad de corriente que pasa por el inductor puede ser calculado usando la siguiente relación.

$$V_L = L * \frac{d}{dt} * I_L \Rightarrow \Delta I_L = \frac{V_L}{L} * \Delta T \quad (2.17)$$

El incremento corriente en el inductor en el estado ON está dado por (2.1)

$$\Delta I_L(+)=\frac{V_{in}}{L}T_{on} \quad (2.18)$$

El decremento de corriente en el inductor en el estado OFF está dado por (2.3).

$$\Delta I_L(-)=\frac{V_{in}}{L}T_{off} \quad (2.19)$$

En un estado continuo donde, la corriente incrementa $\Delta I_L(+)$ en estado ON y la corriente en decremento $\Delta I_L(-)$, en estado OFF estas dos deben ser iguales, de lo contrario, el inductor de corriente tendría un aumento o disminución neta de ciclo a ciclo que no sería una condición de estado estable. Por lo tanto, estas dos ecuaciones se pueden igualar para tener la relación entrada salida de voltaje del Buck Boost.

$$\Delta I_L(+)=\Delta I_L(-) \quad (2.20)$$

$$\frac{V_{in}}{L}T_{on}=\frac{V_{out}}{L}*T_{off} \quad (2.21)$$

$$\frac{V_{in}}{L}D=\frac{V_{out}}{L}*(1-D) \quad (2.22)$$

$$V_{out}=V_{in}\frac{D}{(1-D)} \quad (2.23)$$

La eficiencia de un Buck Boost llega ser del 60 % al 90 % pero por efecto de cálculos lo haremos ideal, entonces la potencia de entrada será igual a la potencia de salida.

$$P_{in} = P_{out} \quad (2.24)$$

$$V_{in} * I_{in} = V_{out} * I_{out} \quad (2.25)$$

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (2.26)$$

Reemplazando (2.23) en (2.26).

$$I_{out} = I_{in} \frac{(1-D)}{D} \quad (2.27)$$

En cuanto la relación entre la corriente de salida I_{out} y la corriente en el inductor I_L , el inductor entrega corriente cuando se encuentra en el estado OFF ver figura 2.24, esta corriente promediada durante un ciclo completo debe ser igual a la corriente de salida I_{out} , pues la corriente promedio del capacitor es cero, debido a que se carga durante el estado off y entrega toda su carga durante el estado ON, así se tiene la siguiente expresión.

$$I_{out} = I_{L \text{ medio}} * (1 - D) \quad (2.28)$$

$$I_{L \text{ medio}} = \frac{I_{L \text{ max}} + I_{L \text{ min}}}{2} \quad (2.29)$$

2.7. Inversor En Puente Completo.

Un puente completo esta formados por dos medios puentes, este a su salida es capaz de entregar el doble de voltaje en su entrada, estos pueden clasificarse en inversores de conmutación bipolar e inversores con conmutación unipolar.

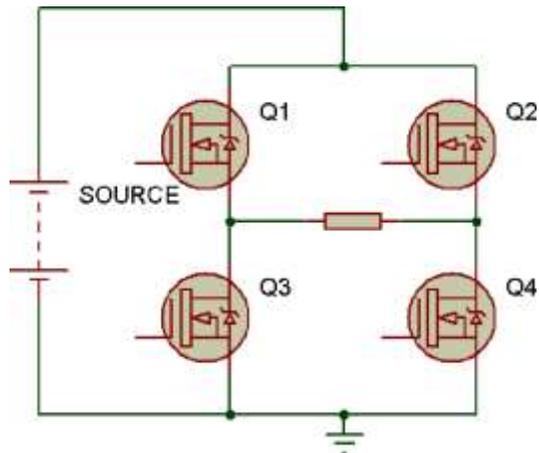


Figura 26: Inversor en puente completo.

Funcionamiento Bipolar

En este tipo de funcionamiento los interruptores tendrán solamente dos posibles combinaciones y solo necesita una señal de control.

Q_1 y Q_4 están cerrados mientras Q_2 , Q_3 se encuentran abiertos por tanto se tendrá el mismo valor de tensión ver figura 33.

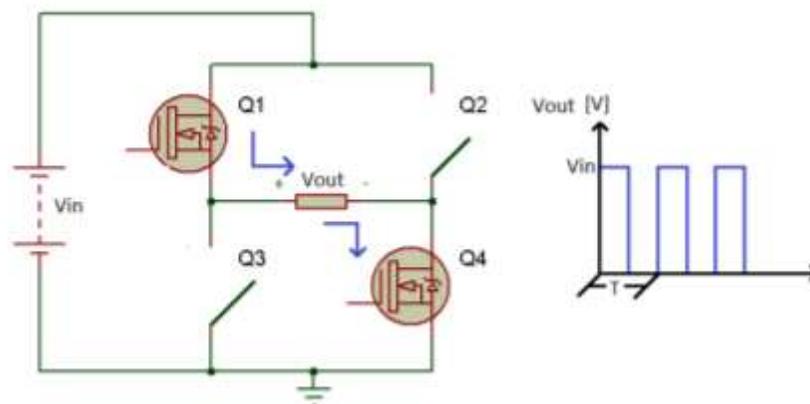


Figura 27: Inversor en puente completo Q_1 y Q_4 ON.

Q_2 y Q_4 están cerrados mientras Q_1 y Q_3 se encuentran abiertos por tanto se tendrá el mismo valor de tensión ver figura 34 a la salida pero invertido $V_{in}-V_{out}$ T está dado por la frecuencia de conmutación.

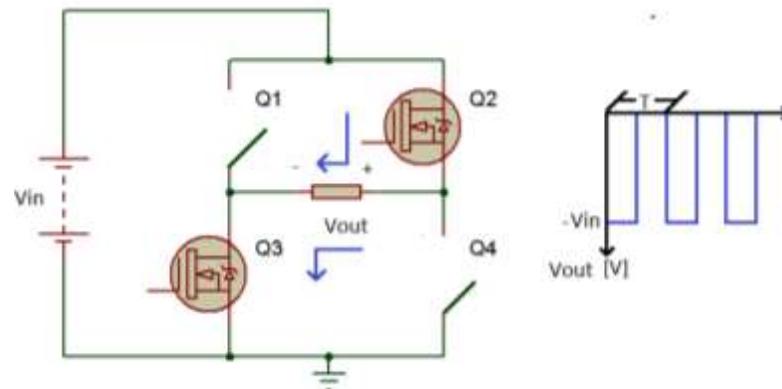


Figura 28: Inversor en puente completo Q2 y Q3 ON.

Funcionamiento Unipolar

Para este caso son necesarias dos señales de control C1, C2 ver figura 30 en los casos anteriores solo se conmutaban dos de los cuatro interruptores a la vez, para un funcionamiento unipolar se deben controlar ambas ramas independientemente, estas señales de control son inversas la una de la otra dando lugar a dos tensiones diferentes cuando Q_1 y Q_4 conmuten tendremos a la salida un Voltaje V_a y cuando Q_2 , Q_3 conmuten habrá un voltaje a la salida de V_b .

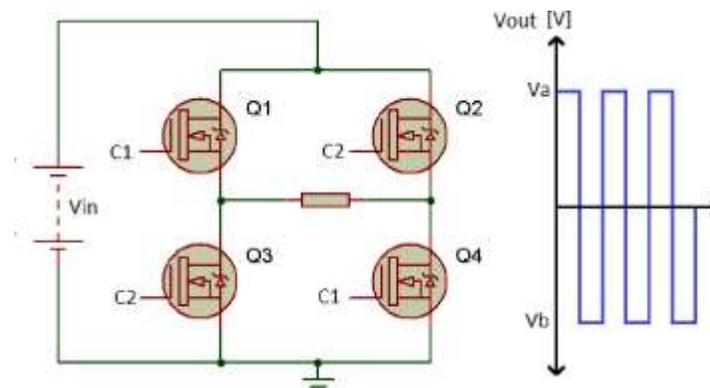


Figura 29: Inversor en puente completo funcionamiento unipolar.

$$V_{out} = \frac{V_a + V_b}{2} \quad (2.30)$$

Hay que considerar que tanto Q_1, Q_3 como Q_2, Q_4 no pueden conmutar al mismo tiempo si estas condiciones se dan se generaría un cortocircuito, para el caso de que Q_1, Q_2 o Q_3, Q_4 se activen al mismo tiempo, no habrá voltaje a la salida.

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BALASTRO Y EL CONTROLADOR FUZZY.

3.1. Filosofía de Operación

El balastro electrónico, está diseñado para suministrar un determinado valor de voltaje y de corriente, para esto cuenta con dos convertidores. Un convertidor CA/CD, encargado de rectificar la tensión alterna en continua y un convertidor CD/CA el mismo que genera la onda cuadrada la cual será aplicada a la lámpara.

Actualmente el convertidor CA/CD está manejado por el controlador Fuzzy y el convertidor CD/CA posee una señal de frecuencia fija.

Por otra parte, el sistema monitorea las señales que intervienen en el proceso, tanto en el encendido como en el de control.

Dentro de estas señales se detallan las siguientes:

Señales de entrada:

- **Corriente:** Proveniente del convertor CA/CD es monitoreada y realimentada hacia el controlador Fuzzy, ya que el control propuesto está basado en el error, que resulta de la relación de la corriente de salida y el set point dado.
- **Voltaje:** Proveniente del convertor CD/CA el cual es empleado para determinar cuándo ha terminado la etapa de precalentamiento de la lámpara.

Señales de Salida

- **PWM:** Proveniente del controlador Fuzzy. Esta señal de frecuencia fija pero de ciclo de trabajo variable, será la encargada de situar la corriente en 1 [A] en el convertor CA/CD.
- **Frecuencia:** Esta señal de frecuencia y ciclo de trabajo fijo será entregada al convertor CD/CA. El cual está encargado de generar la onda cuadrada de potencia que alimentará a la lámpara

3.2. Diseño Del Controlador Fuzzy

Los controladores difusos son reguladores no-lineales, que por medio de la selección adecuada de funciones de pertenencia y el establecimiento de una base de reglas se pueden compensar no-linealidades en el sistema de regulación de procesos.

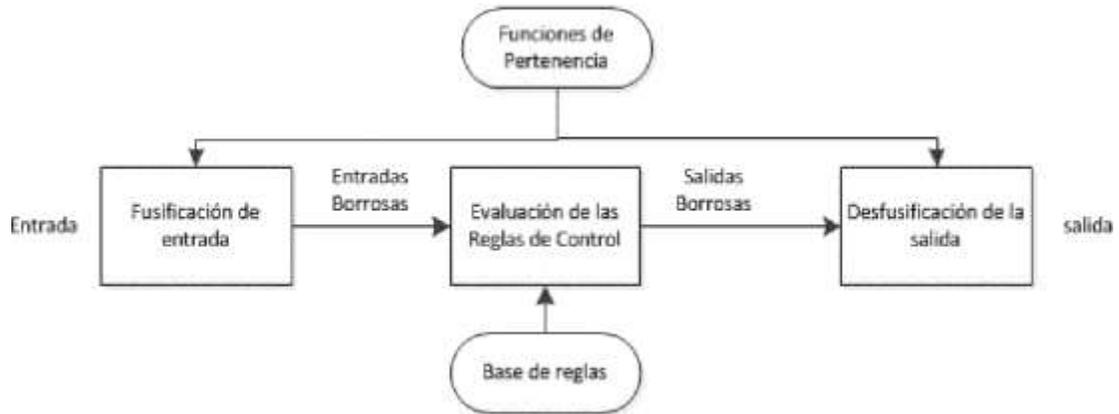


Figura 30: Lógica Difusa.

Fuente: (Kevin M. Passino, 1998)

3.2.1 Selección De Entradas Y Salidas.

El control del balastro electrónico tiene como objetivo realizar un calentamiento rápido y apropiado en la lámpara, mantener la potencia y luminosidad nominal ante perturbaciones de la red de alimentación y extender su vida útil. Para lograr esto es necesario controlar la corriente en la lámpara, el control en la corriente permite que el arco de descarga no choque contra las paredes de la ampolla evitando así el efecto de parpadeo y la destrucción de la misma ver en la figura 37.

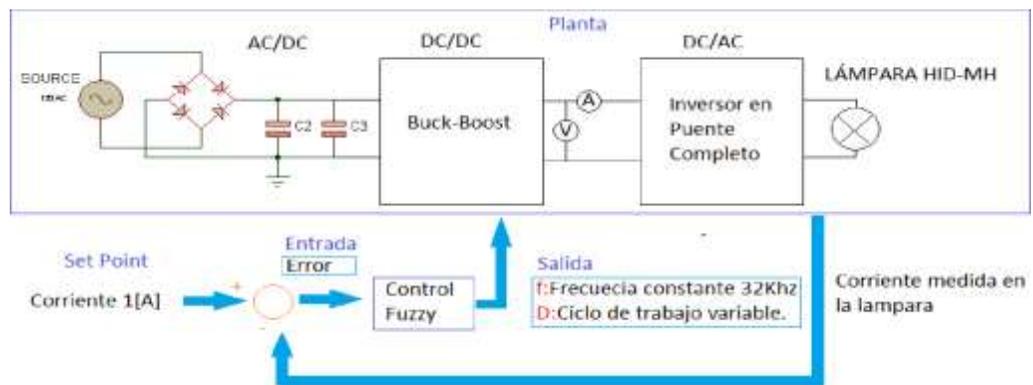


Figura 31: Entradas y salidas del control Fuzzy.

Entrada.

$$e = I_{med} - SP \quad (3.1)$$

Donde

e: Error de la corriente en el balastro .

I_{med}: Corriente medida en el balastro.

SP: Valor de corriente deseado en el balastro.

Salida.

El control de corriente en el balastro electrónico solo puede ser realizado por la etapa del Buck-Boost debido a que es una fuente conmutada, su control se lo realiza bajo la variación de PWM a una frecuencia constante y ciclo de trabajo variable.

$$D = \frac{t}{T} \quad (3.2)$$

Donde

D: Ciclo de trabajo (Duty).

t: Tiempo en el que la onda cuadrada es positiva .

T: Periodo de la onda cuadrada.

3.2.2 Fusificación.

Para comenzar con el proceso de fusificación, es necesario definir los conjuntos difusos que serán empleados de tal manera que se puedan definir las variables de entrada y salida, así mismo es necesario definir los grados de pertenencia para cada una de las variables de control, para las variables de entrada y salida se utiliza diez conjunto difusos, definidos por las siguientes variables lingüísticas.

Error

- GN Grande Negativo.
- PN Pequeño Negativo.
- Z Zero.
- PP Pequeño Positivo.
- GP Grande Positivo

Duty

- GN Grande Negativo.
- PN Pequeño Negativo.
- Z Zero.
- PP Pequeño Positivo.
- GP Grande Positivo.

El siguiente paso es seleccionar la función de pertenencia, estos son modelos matemáticos para los términos lingüísticos que permite representar un conjunto difuso

de forma gráfica en donde el eje de las x representa el universo de discurso, mientras en el eje y, se sitúan los grados de pertenencia. Se seleccionó la función de pertenencia tipo triangular debido a su bajo coste computacional ver figura 33

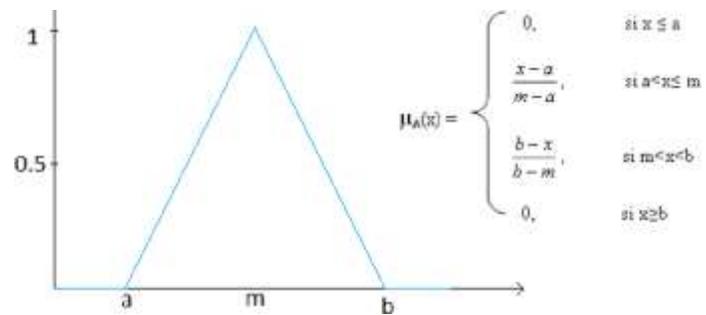


Figura 32: Función de pertenencia

Ahora que ya se sabe cómo especificar el significado de un valor lingüístico a través de una función de pertenencia se puede especificar el número de funciones de pertenencia para los diez valores lingüísticos, el siguiente paso es especificar los bordes de cada función de pertenencia para cada uno de los valores lingüísticos ver figura 34.

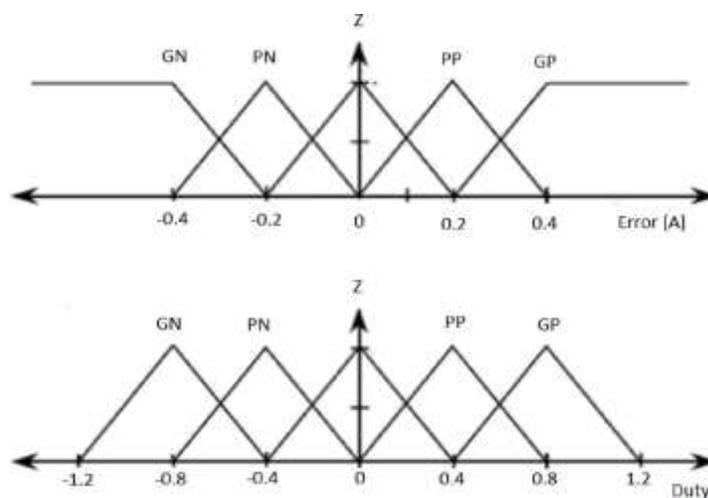


Figura 33: Función de pertenencia entrada y salida.

En el proceso de fusificación, los valores de entrada se comparan con sus respectivos conjuntos difusos para determinar el conjunto de pertenencia al cual pertenece el valor de entrada es por eso que es necesario definir la función matemática para cada función de pertenencia.

$$GN = \begin{cases} 1 & e \leq -0.4 \\ -5e - 1 & -0.4 < e \leq -0.2 \\ 0 & e > -0.2 \end{cases}$$

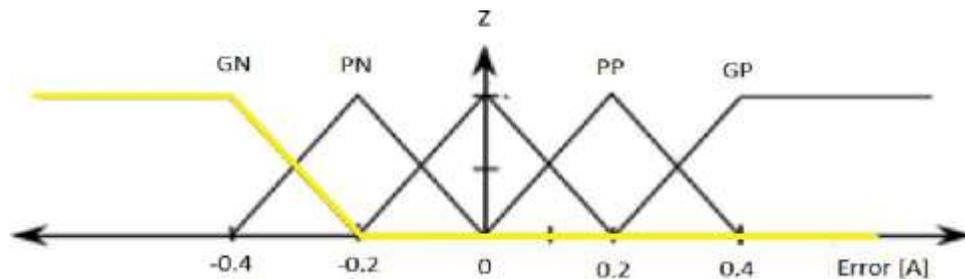


Figura 34: Grande Negativo

$$PN = \begin{cases} 0 & e \leq -0.4 \\ 5e + 1 & -0.4 < e \leq -0.2 \\ -5e & -0.2 < e \leq -0 \\ 0 & e > 0 \end{cases}$$

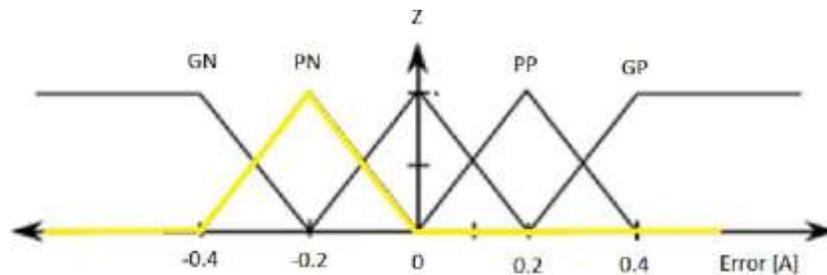
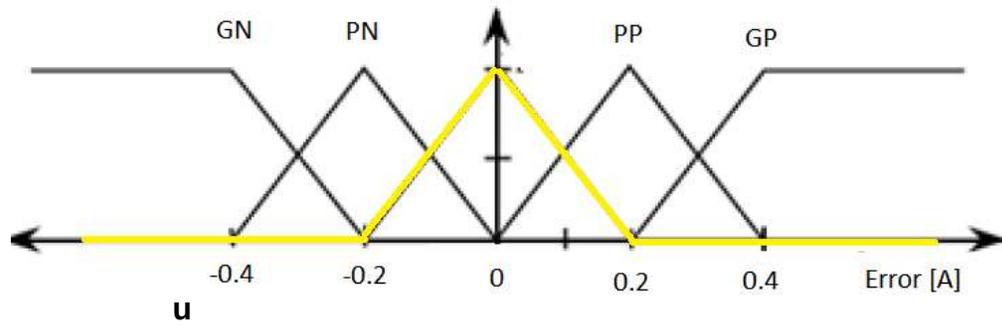


Figura 35: Pequeño Negativo

$$Z = \begin{cases} 0 & e \leq -0.4 \\ 5e + 1 & -0.2 < e \leq -0 \\ -5e + 1 & 0 < e \leq 0.2 \\ 0 & e > 0.2 \end{cases}$$



ra 36: Zero

$$PP = \begin{cases} 0 & e \leq 0 \\ 5e & 0 < e \leq 0.2 \\ -5e + 2 & 0.2 < e \leq 0.4 \\ 0 & e > 0.4 \end{cases}$$

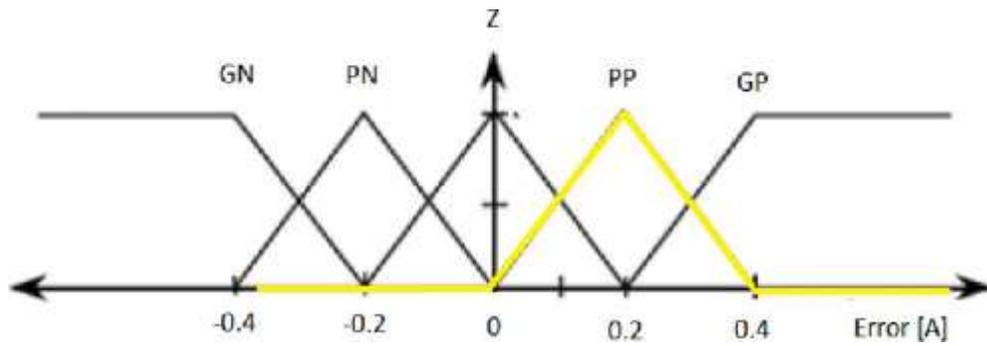


Figura 37: Pequeño Positivo

$$GP = \begin{cases} 0 & e \leq 0.2 \\ 5e - 1 & 0.2 < e \leq 0.4 \\ 0 & e > 0.4 \end{cases}$$

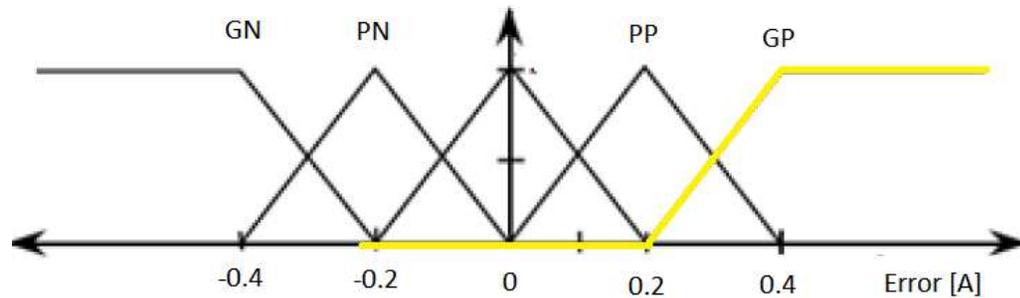


Figura 38: Grande Positivo

La función de pertenencia GN,PN,Z,PP,GP puede ser expresada bajo el siguiente Pseudocódigo

$$gn = 1*(e \leq -0.4) - (5*e + 1)*(e > -0.4 \ \&\& \ e \leq -0.2) + 0*(e > -0.2)$$

$$pn = 0*(e \leq -0.4) + (5*e + 2)*(e > -0.4 \ \&\& \ e \leq -0.2) - (5*e)*(e > -0.2 \ \&\& \ e \leq 0) + 0*(e > 0)$$

$$z = 0*(e \leq -0.2) + (5*e + 1)*(e > -0.2 \ \&\& \ e \leq 0) - (5*e - 1)*(e > 0 \ \&\& \ e \leq 0.2) + 0*(e > 0.2)$$

$$pp = 0*(e \leq 0) + (5*e)*(e > 0 \ \&\& \ e \leq 0.2) - (5*e - 2)*(e > 0.2 \ \&\& \ e \leq 0.4) + 0*(e > 0.4)$$

$$gp = 0*(e \leq 0.2) + (5*e - 1)*(e > 0.2 \ \&\& \ e \leq 0.4) + 1*(e > 0.4)$$

3.2.3. Mecanismo De Inferencia

El mecanismo de inferencia tiene como objetivo utilizar las variables que han sido fusificadas para poder llegar por medio de un conocimiento del operador a una conclusión o consecuencia, este mecanismo es muy parecido a la lógica formal. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina la estrategia de control el cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operador

De acuerdo a la experiencia que se ha tenido con el balastro electrónico con respecto al error de corriente (entrada), se toman las siguientes decisiones para la salida (duty) ver tabla 2.

Tabla 2: Reacción de implicación del balastro electrónico

Error	GN	PN	Z	PP	GP
Duty	GP	PP	Z	PN	GN

Si el error es GN entonces duty es GP.

Si el error es PN entonces duty es PP.

Si el error es Z entonces duty es Z.

Si el error es PP entonces duty es PN.

Si el error es GP entonces duty es GN.

3.2.4. Desfusificación.

La desfusificación es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero es en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia borrosa, esta genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real, para poder llegar a esta representación se utilizara la técnica de desfuzificación por centro de gravedad.

Centro de gravedad

Consiste en determinar el centro de gravedad de todas las áreas generadas por el mecanismo de inferencia difusa, y con ello, la manipulación en forma cuantitativa que debe ser llevada a cabo de acuerdo al mecanismo de inferencia difusa ver (3.3)

$$ucris = \frac{\sum_{i=1}^r b_i * U_i}{\sum_{i=1}^r U_i} \quad (3.3)$$

Donde

B_i : centro de la función de pertenencia del conjunto difuso.

R: Número de reglas

$\sum_{i=1}^r U_i$: Sumatoria de las áreas de los conjuntos difusos ver figura 45.

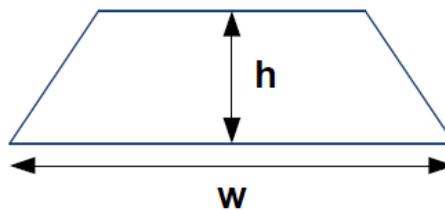


Figura 39: Áreas de activación de reglas.

3.3. Simulación Del Control Fuzzy

En esta sección se realiza la simulación del controlador Fuzzy mediante matlab, para esto se empleará la herramienta simulink la cual permitirá construir el balastro electrónico que está conformado por el Buck-Boost y el puente H, para el caso del controlador será implementado mediante el bloque de simulink matlab function, a continuación se muestra el esquema realizado en simulink ver figura 41

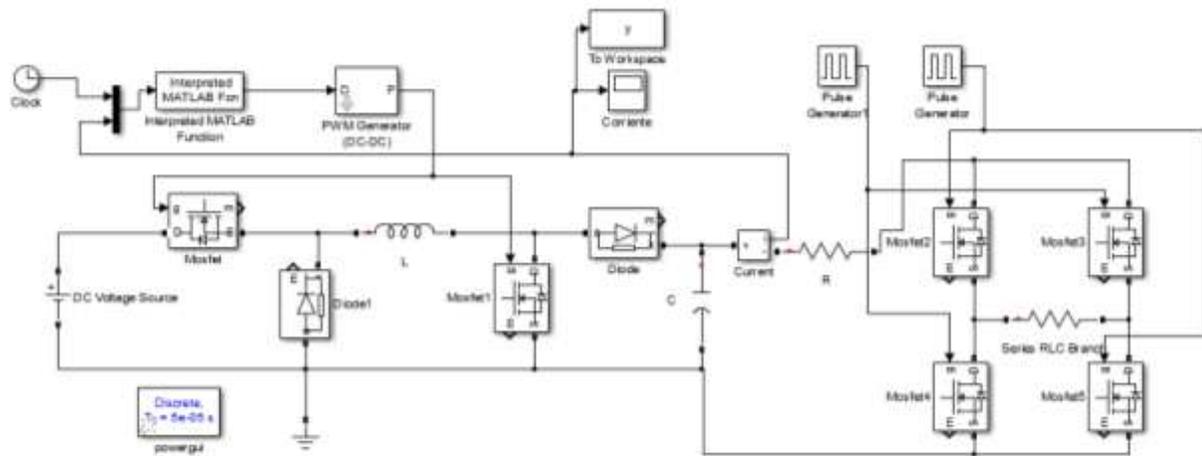


Figura 40: Balastro Electrónico en simulink.

Los valores utilizados para la simulación son los ya calculados previamente para el caso del Buck Boost, la fuente de alimentación es de 160[v], el inductor de 1[mH] y el capacitor de 47[uf], para el caso del puente H se utiliza una resistencia de 250[ohm] que representa la lámpara HID-MH, como primer punto se simula al balastro electrónico sin control Fuzzy con un ciclo de trabajo constante del 50%

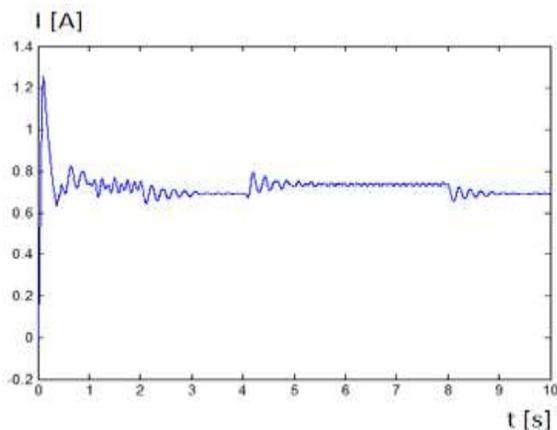


Figura 41 Corriente en el balastro electrónico sin control

Como se puede apreciar en la figura la corriente tiene una especie de respuesta subamortiguado cíclica ante un valor constante de Duty generando una corriente fluctuante que provocara varios inconvenientes en la lámpara como parpadeo, daños en la ampollita o que la lámpara simplemente se apague, es por eso que es necesario un controlador capaz de mantener una corriente constante, a continuación se muestra el controlador Fuzzy que ha sido programado dentro de un bloque de simulink llamado matlab function.

Una vez definido el controlador hay que tomar en cuenta que el controlador se activa después de 1 segundo con una condición inicial del ciclo de trabajo al 50 %, y que el set point de corriente está establecido a 1 [A].

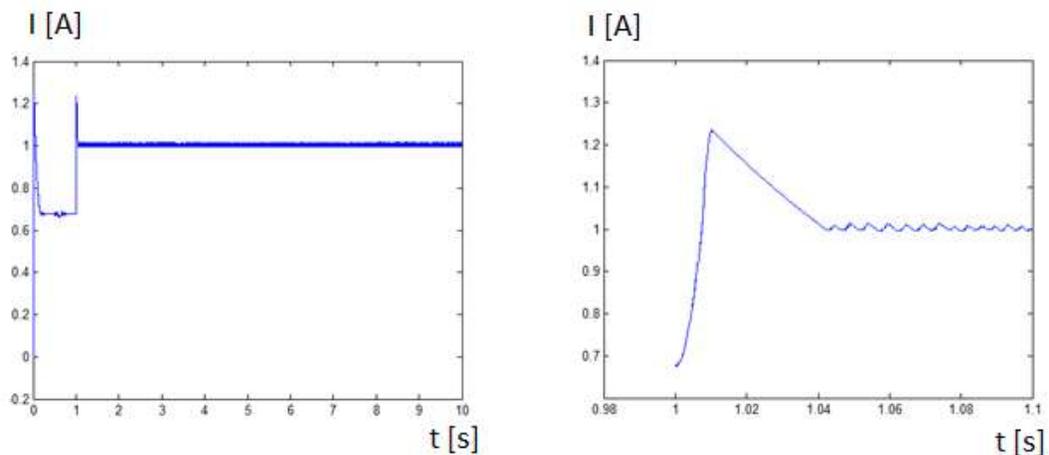


Figura 42 Corriente en el balastro electrónico con control

Como se puede observar en la figura 43 la corriente se mantiene en un valor estable con un tiempo de establecimiento aproximado a los 40 ms y un sobre pico aproximado del 23 %.

3.4. Implementación Del Balastro

Uno de los puntos claves es la descripción del funcionamiento de las placas de potencia diseñadas en una etapa previa a la presente tesis, las cuales se las han modificado para adaptarlas a los nuevos requerimientos que posee este trabajo.

Se describirán los diferentes procedimientos y diseños para obtener la placa del controlador, con lo cual se podrán determinar las características de la lámpara de una forma mucho más rápida y precisa, a fin de realizar en base al sensamiento el control de la misma y la optimización del sistema.

3.4.1. Diseño E Implementación Del Buck-Boost

EL modo de conducción continua de un convertidor está en función de varios parámetros, voltaje de entrada, voltaje de salida, corriente de entrada y el valor de su bobina, el Buck-Boost puede ser diseñado para que trabaje en modo continuo con cargas por encima del 5 % al 10 % de su carga nominal, por lo general tanto voltajes de entrada y salida son conocidos así como la corriente en la carga dejándonos al valor de la inductancia como un parámetro a ser encontrado.

3.4.1.1 Etapa De Potencia

Rectificador de onda completa.

El circuito Buck-Boost será alimentado a través de la red eléctrica, por eso es necesario convertir el voltaje CA en CD para este propósito se utiliza un rectificador en onda completa como se muestra en la figura 44.

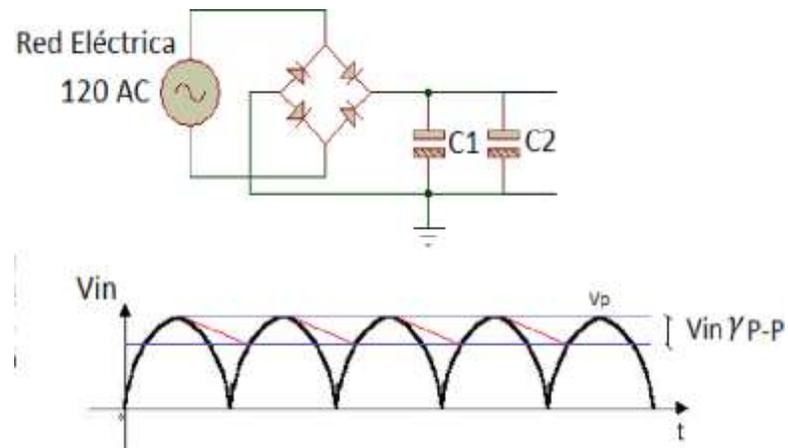


Figura 43: Rectificador de onda completa.

Para la implementación del rectificador de onda completa es necesario encontrar el valor de la capacitancia para esto se empezara calculando el voltaje pico del rectificador de onda completa.

$$V_{p1} = V_{rms} * \sqrt{2} \quad (3.4)$$

$$V_{p1} = 120 * \sqrt{2} \quad (3.5)$$

El voltaje de polarización inverso del diodo suele ser de 0,7 [V] debido a que se trata de un rectificador en onda completa existen dos diodos.

$$V_p = V_{p1} - 2 * 0.7 = 169.7 - 2 * 0.7 = 168.3 \quad (3.6)$$

Para continuar es necesario calcular a que es igual el voltaje rizo pico-pico que está dado por la siguiente ecuación.

$$V_{DC} = V_p - \frac{V_{rizo\ p-p}}{2} \quad (3.7)$$

$$V_{rizo\ p-p} = \frac{1}{C} \int_0^T I_{DC} \quad (3.8)$$

$$V_{rizo\ p-p} = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{DC} \quad (3.9)$$

$$V_{rizo\ p-p} = \frac{I_{DC}}{C} t \Big|_0^{\frac{T}{2}} \quad (3.10)$$

$$V_{rizo\ p-p} = \frac{I_{DC}}{2 * f * C} \quad (3.11)$$

Se ha propuesto un porcentaje de rizo menor o igual al 5%.

$$\%rizo = \frac{V_{rizo\ p-p}}{V_p} \quad (3.12)$$

$$V_{rizo\ p-p} = 0.05 * v_p = 0.05 * 168.3 = 8.415 \quad (3.13)$$

$$8.415 = \frac{I_{DC}}{2 * f * C} \quad (3.14)$$

$$V_{dc} = 168.3 - 8.415 = 159.88 \quad (3.15)$$

La potencia nominal de la lámpara HID-MH es de 250 [w] que es la potencia de salida, considerado que el Buck-Boost en las peores condiciones es 80% eficiente se aproximada a tener una potencia de 300 [w] conociendo el voltaje VDC y la potencia

se encuentra, la corriente IDC que es igual a $I_{DC} = 300/159.88 = 1.87 [A]$ al encontrar la corriente IDC se puede encontrar la capacitancia.

$$C = \frac{I_{DC}}{2 * f * 8.415} = \frac{1.87}{2 * 60 * 8.415} = 1851 [uf] \approx 2000 [uf] \quad (3.16)$$

Se debe considerar que el puente de diodos soporten una corriente mayor a 1.87 [A] comercialmente existen puentes de diodos a 3[A] a continuación se mostrara como queda el rectificador de onda completa ver figura 45.

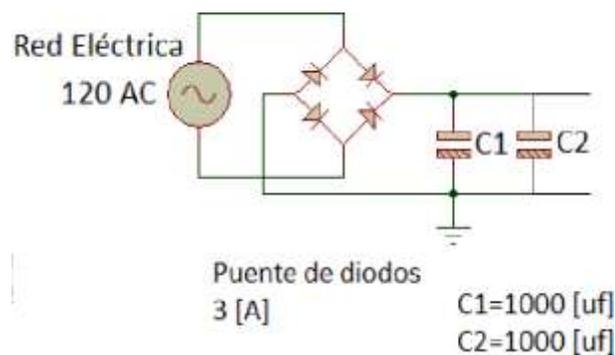


Figura 44: Rectificador de onda completa a implementar.

Bobina

Diseño de la Bobina

El mínimo valor del inductor para mantener el modo continuo de conducción puede ser determinado bajo el siguiente procedimiento.

Primero, se define una corriente crítica I_{Lcrit} , esta es la mínima corriente necesaria para mantenerse en modo continuo de conducción este valor se muestra en la figura 46.

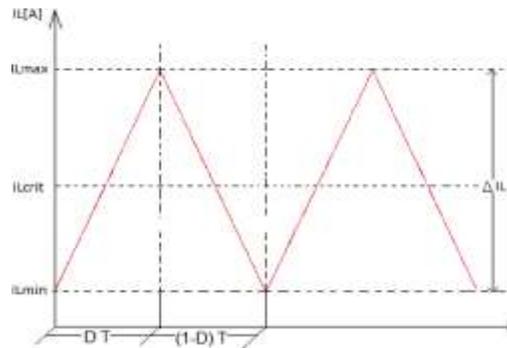


Figura 45: Formas de onda de la IL crítica.

La corriente del inductor promedio mínima para mantener el modo de conducción continua viene dada por:

$$I_{L \text{ crit}} = \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.16)$$

Como segundo paso es calcular el valor de L, para esto se empleara la relación anterior ver (3.16) y la igualaremos ya sea con la relación $\Delta I_L(+)$ o $\Delta I_L(-)$, obsérvese que la relación es independiente de la corriente de salida, esta se usara para encontrar Lmin la relación $\Delta I_L(-)$.

$$I_{L \text{ crit}} = \frac{1}{2} \frac{V_{\text{out}}}{L} * (1 - D) * T \quad (3.17)$$

$$I_{L \text{ crit}} = \frac{V_{\text{out}} * (1-D)}{2 * L * F} \quad (3.18)$$

Hay que tener en cuenta que se desea encontrar los valores mínimos para garantizar el modo continuo de conducción quedando la ecuación de la siguiente manera.

$$L_{\min} \geq \frac{V_{\text{out}}*(1-D)^2}{2*I_{L \text{ crit}}*F} \quad (3.19)$$

Dejando L_{\min} en términos de I_{out} usaremos la (3.11) quedando

$$L_{\min} \geq \frac{V_{\text{out}}*(1-D)^2}{2*I_{\text{out}}*F} \quad (3.20)$$

Fabricación Del Toroide.

Ya solventado la alimentación del Buck Boost es necesario encontrar el valor de la inductancia para esto es necesario encontrar el valor de D dada por la EQ 2.23 se propone que la frecuencia de conmutación sea de 32 [KHz].

Se conoce:

$$V_{\text{in}}=159.88 \text{ [V]}; V_{\text{out}}=250[\text{v}].$$

$$I_{\text{in}}=1,87[\text{A}]; I_{\text{out}}=1[\text{A}].$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \frac{D}{(1-D)} \quad (3.21)$$

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (3.22)$$

Reemplazando.

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (3.23)$$

$$\frac{250}{159.88} = \frac{D}{(1-D)} \quad (3.24)$$

Resolviendo se obtiene $D=0,60$, para encontrar el valor de la inductancia se usa (2.34) .

$$L_{min} \geq \frac{V_{out}*(1-D)^2}{2*I_{out}*f} \quad (3.25)$$

Remplazando.

$$L_{min} \geq \frac{250*(1-0.6)^2}{2*1*32000} \quad (3.26)$$

$$L_{min} \geq 625[uH] \approx 1[mH] \quad (3.27)$$

Para diseñar un toroide de 1[mH] que sea de potencia es necesario utilizar un núcleo toroidal.

Núcleo Toroidal

Los núcleos toroidales son elementos de materiales como ferrita y hierro pulverizado los cuales al utilizarlos en el diseño de bobinas se convierten en componentes pasivos de dos terminales que generan un flujo magnético cuando se hacen circular por ellas una corriente eléctrica. La principal característica en este tipo de bobinas es que el flujo generado no se dispersa hacia el exterior ya que por su forma se crea un flujo magnético cerrado, dotándolas de un gran rendimiento y precisión.

Selección Del Núcleo Toroidal

Al diseñar un núcleo toroidal hay que considerar tres aspectos, el rango de frecuencia en el que funciona el núcleo, la corriente que pasará a través de la bobina y el material del núcleo del toroide.

La frecuencia a la que va a trabajar la bobina está dada por la frecuencia de conmutación propuesta por el diseñador que está en orden de los 32Khz .La mayoría de estos toroides trabajan bien en el orden de los MHz es por eso que se debe seleccionar un toroide que trabaje en un rango de los 10 a los 100 KHz el rango de funcionamiento suele estar dado por los colores del toroide.

Existen dos tipos de materiales de los que están elaborados los toroides, el de ferrita y hierro pulverizado. Esto definen la frecuencia de trabajo y el coeficiente de inductividad que es la relación nano Henrios o micro Henrios por 100 vueltas.

En aplicaciones de potencia son más adecuados los núcleos de hierro pulverizado que los de ferrita. El hierro pulverizado tiene la propiedad de no cambiar su permeabilidad permanente a sobre excitaciones, también presenta un mayor factor de calidad debido a que tienen pérdidas internas mucho menores.

El núcleo seleccionado para esta aplicación tiene las siguientes características:



Figura 46: Núcleo Toroidal

Fuente: (Kevin M. Passino, 1998)

Tabla 3: Características del Núcleo toroidal

Símbolo	MS-226060
Productor	Arnold
Longitud	16mm
Diámetro interior	26mm
Diámetro exterior	58mm
Material del núcleo	Sendust
Coefficiente de inductividad	138 nH
Frecuencia máxima	500 kHz

El número de espiras que se debe dar en el núcleo toroidal está dado por la siguiente ecuación.

$$L = AL * N^2 \quad (3.28)$$

Donde

L: Inductancia deseada en [nH].

N: número de espiras.

AL: Coeficiente de inductividad

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} = \sqrt{\frac{1000000[nH]}{138[nH]}} = 85[vueltas] \quad (3.29)$$

Capacitor

Selección del capacitor

El capacitor del Buck-Boost tiene la funcionalidad de limitar la salida de tensión a un valor determinado en el rizado, para la operación en modo continuo será necesario tener una ecuación que este en función de la corriente de salida I_{out} , la frecuencia de conmutación y el valor rizo del voltaje de salida.

En el estado On el capacitor está entregando toda su energía almacenada hacia la carga ver figura: 26 por tanto la $\Delta I_C = I_{out}$

$$\Delta I_C = C \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} \quad (3.30)$$

$$I_{out} = C \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} \quad (3.31)$$

$$C \geq \frac{I_{out} * \Delta t}{\Delta V_{out}} \quad (3.32)$$

En el estado ON $\Delta t = CD * T = \frac{D}{F}$

$$C \geq \frac{I_{out} * D}{\Delta V_{out} * F} \quad (3.33)$$

$$\Delta V_{out} = \%Rizo * V_{pico} \quad (3.34)$$

Cálculo del Capacitor.

El último paso es calcular el valor de la capacitancia del Buck Boost para esto haremos uso de las EQ 2.37 2.39. Como parámetro del diseñador se ha propuesto un rizado de voltaje a la salida del 2 %.

$$C \geq \frac{I_{out} * D}{\Delta V_{out} * F} \quad (3.35)$$

$$\Delta V_{out} = \%Rizo * V_{pico} \quad (3.36)$$

$$\Delta V_{out} = 0.02 * 250 = 5[V] \quad (3.37)$$

$$C \geq \frac{1 * 0.65}{5 * 32000} \quad (3.38)$$

$$C \geq 4[\mu f] \approx 10[\mu f] \quad (3.39)$$

Una vez ya encontrados todos los valores del Buck-Boost nos queda como la siguiente figura ver figura 48.

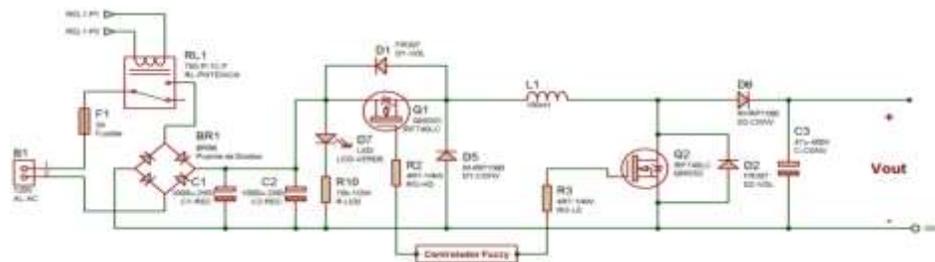


Figura 47: Etapa de Potencia del Buck Boost.

3.4.1.2 Etapa De Control

Para recibir la señal de control se encuentra un opto acoplador 6N137, que permite aislar y proteger a la etapa de control de la etapa de potencia, este opto tiene la capacidad de responder, en la práctica, hasta 120KHz, lo cual es aceptable para este prototipo.

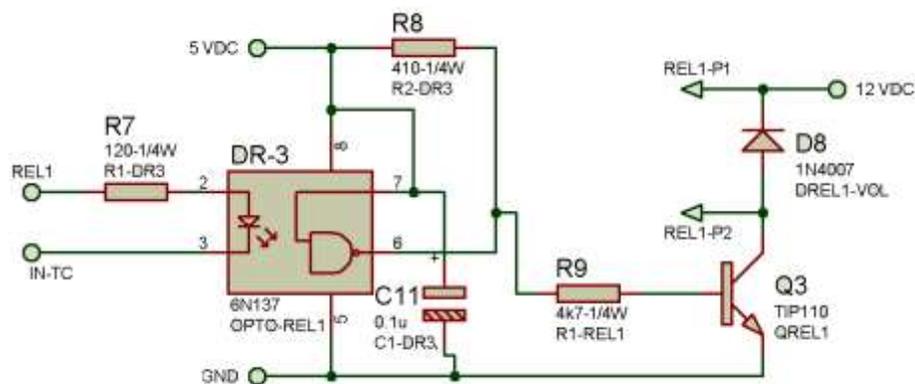


Figura 48: Acoplador 6N137

El componente más importante de este circuito es el controlador o drivers TLP 250 este es el responsable de la operación de los transistores del circuito de potencia. Además esta etapa cuenta con un circuito de alimentación bootstrap él cual está formada por un diodo (DBS) y un capacitor bootstrap (CBS).

Esta técnica es necesaria cuando se requiere que el circuito de excitación sea flotante respecto a la tierra del circuito, es decir, permite tener una tierra virtual, esto es conveniente para activar los transistores Mosfets que no están referenciados a la tierra del circuito.

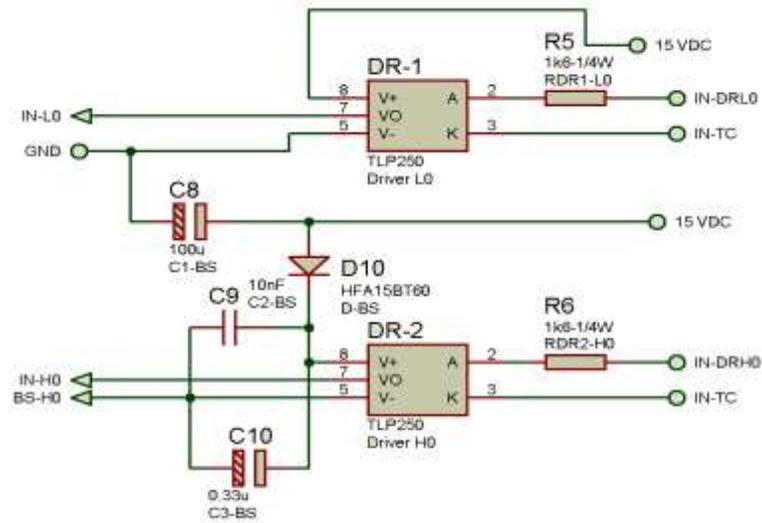


Figura 49: Drivers y Circuito bootstrap

3.4.2 Implementación Puente H

3.4.2.1 Etapa de Potencia

Para la etapa de potencia, como se mencionó se emplean 4 Mosfets IRF740 en disposición puente H que se alimentan de un bus de 250 VDC. Los cuales están alimentados por el Buck-Boost.

Debido a que se requiere optimizar y aumentar la eficiencia en el balastro electrónico se buscó reemplazar la bobina que limitaba la corriente en la lámpara HID por una resistencia fija de potencia de 20 ohmios entre el Buck-Boost y el puente H de tal forma, que en el puente H solo se conectara la lámpara HID-MH, la cual debe garantizar una potencia máxima en la lámpara, la lámpara debida a sus características esta tiende a variar su impedancia en base a los cambios de frecuencia en donde la

mayor impedancia se obtiene en altas frecuencias y la menor impedancia en bajas frecuencias.

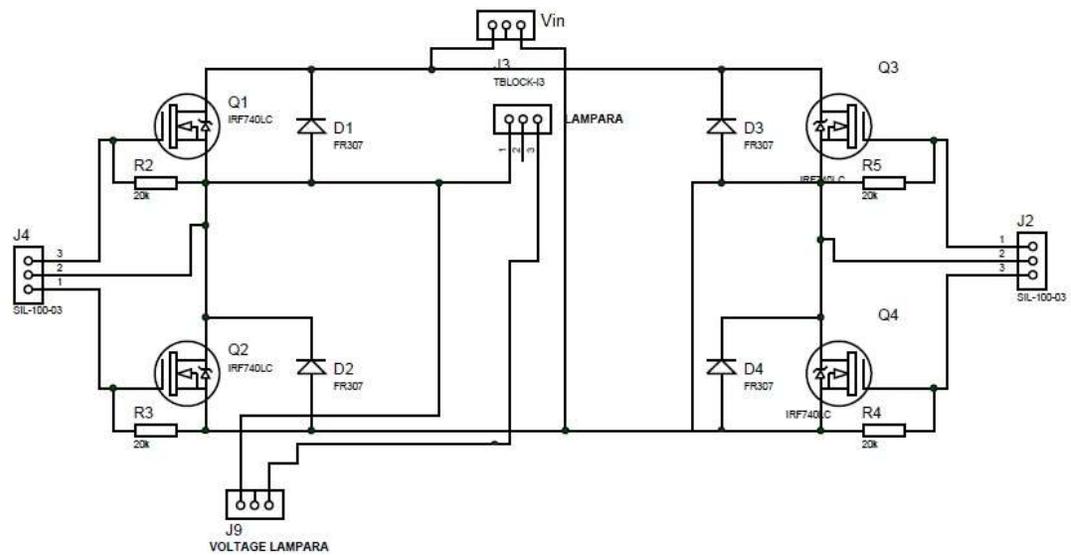


Figura 50: Etapa de Potencia del Puente H

3.4.2.2 Etapa de Control

Dado que la señal que entrega el opto acoplador es invertida es necesario colocar un circuito integrado negador, la compuerta 7404, es ideal para este propósito.

El componente más importante de este circuito de interfaz de potencia es el controlador para transistores IR2130, este es el responsable de la operación de los transistores del circuito de potencia, cuyo funcionamiento en forma general se describe a continuación.

El integrado IR2130 es un driver de alta velocidad y alto voltaje, usado para MOSFET e IGBT con tres canales independientes de salida tanto en alto como en bajo

con una tierra referencial. Posee una entrada de señal de TTL, 5 [V], y una salida de señal para activación de la compuerta, para este caso es de 15 [V], para cada transistor Mosfets, es decir, son seis entradas y seis salidas. Para la configuración del hardware de este integrado hay que tener varias consideraciones como son el aislamiento de las señales por precaución y la configuración del circuito de bootstrap.

El integrado cuenta con protecciones en sobre corriente (ITRIP), el cual en caso de un cortocircuito o una sobrecarga es deseable apagar todas las salidas. En ITRIP se encuentra un monitoreo constante de la corriente a través de un comparador. Así también tiene un circuito de falla, el cual consiste en un enclavamiento, el cual es puesto a 1 cuando se produce una falla, esta condición mantiene las salidas bloqueadas o elimina la alimentación del circuito para no seguir operando. El tiempo muerto generado por el integrado en las señales de salida, permite que los transistores conectados a un mismo ramal no puedan conectarse al mismo tiempo, evitando de esta manera un cortocircuito.

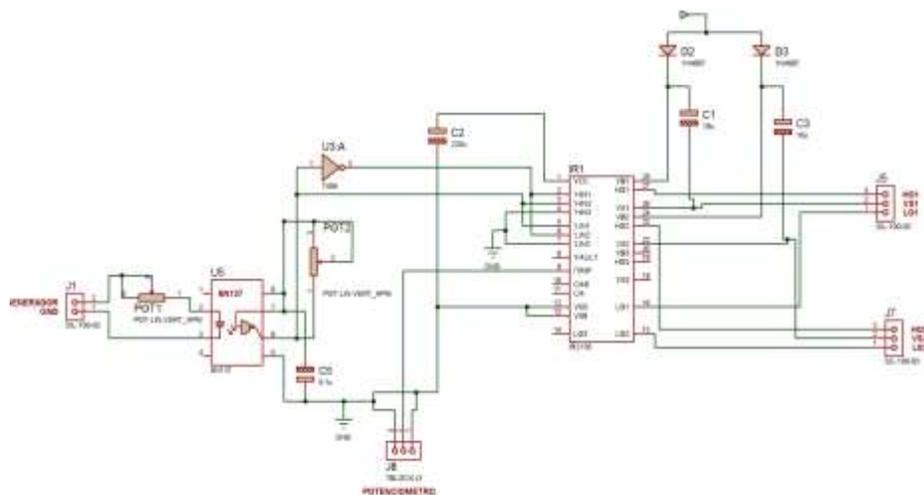


Figura 51 Etapa de Control del Puente H

3.4 Características De Funcionamiento

3.4.1 Procedimiento de encendido

- Alimentar los circuitos con tensión continua y no con la alterna esto evitara daños en los convertidores ya que primero hay que verificar que exista la señal de control para posteriormente alimentar todo el sistema con tensión alterna.
- Verificar la existencia de la señal de control, tanto la proveniente del controlador Fuzzy con la señal de frecuencia fija.
- Comprobar que las señales de los drivers de activación de los Mosfets estén dentro de los valores adecuados. Para los Mosfets del convertor CA/CD los valores están entre 11 y 12 [V] mientras que para los Mosfets del convertor CD/CA sus valores están comprendidos entre 11 y 15 [V]
- Una vez que se ha comprobado la existencia de las señales de control y de los drivers. Es necesario comprobar la señal de salida de todo el sistema. Para lo cual se medirá en la salida del convertor CD/CA por lo general esta se encuentra a razón de los mV pero se puede notar que posee la forma de onda que deseamos para la lámpara, es decir, una onda cuadrada.

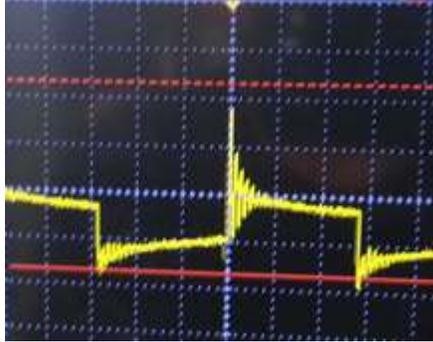


Figura 52: Señal de salida del sistema a una escala de 200 [mV]

CAPÍTULO 4

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Buck Boost

El análisis de los resultados del Buck Boost abarca:

- Buck Boost con Carga
- Buck Boost sin Carga
- Perdida de los Mosfet

4.1.1 Buck Boost con Carga

El convertidor se ha alimentado con distintos voltaje, los valores van desde 20[V] hasta los 60 [V]. En pasos de 10 voltios no son tan elevados debido a que se busca evitar daños en los elementos. Así como los valores de ciclo de trabajo son del 40 %, 50 % y 60 %. Con los cuales se pondrá en función de reductor y elevador el Buck-Boost.

Los siguientes datos cumplen con la ecuación:

$$V_{out} = V_{in} \frac{D}{(1-D)} \quad (4.1)$$

Dónde:

D: Es el ciclo de trabajo.

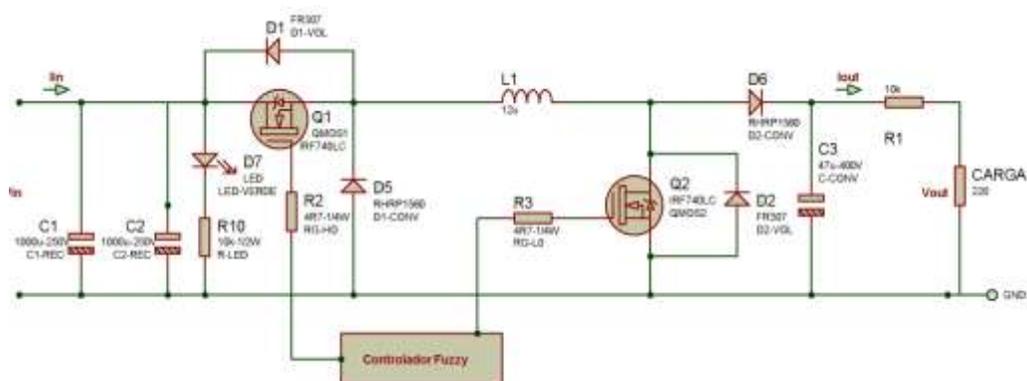


Figura 53 Circuito Buck Boost

Tabla 4 Buck Boost Con Carga

Fuente		Salida			Dutty	Eficiencia	Ganancia V	Ganancia I	
Vin	Iin	Pin	Vout	Iout	Pout	%	Pout/Pin	Vout/Vin	Iout/Iin
20.00	0.07	1.40	12.00	0.07	0.84	40.00	0.60	0.60	1.00
	0.15	3.00	18.20	0.11	2.00	50.00	0.67	0.91	0.73
	0.33	6.60	27.50	0.17	4.68	60.00	0.71	1.38	0.52
30.00	0.11	3.30	18.80	0.12	2.26	40.00	0.68	0.63	1.09
	0.23	6.90	28.03	0.17	4.77	50.00	0.69	0.93	0.74
	0.50	15.00	42.10	0.26	10.95	60.00	0.73	1.40	0.52
40.00	0.15	6.00	25.43	0.16	4.07	40.00	0.68	0.64	1.07
	0.31	12.40	37.77	0.24	9.06	50.00	0.73	0.94	0.77
	0.67	26.80	56.50	0.35	19.78	60.00	0.74	1.41	0.52
50.00	0.19	9.50	32.23	0.20	6.45	40.00	0.68	0.64	1.05
	0.39	19.50	47.70	0.30	14.31	50.00	0.73	0.95	0.77
	0.85	42.50	71.20	0.45	32.04	60.00	0.75	1.42	0.53
60.00	0.22	13.20	38.90	0.25	9.73	40.00	0.74	0.65	1.14
	0.47	28.20	57.50	0.36	20.70	50.00	0.73	0.96	0.77
	1.02	61.20	85.60	0.54	46.22	60.00	0.76	1.43	0.53

En la tabla 3 se ve como al aumentar el ciclo de trabajo el convertidor funciona en su faceta de elevador que es aproximadamente de 1.4 veces el voltaje de entrada pero la corriente disminuye ya que se cumple que si el valor del voltaje sube la corriente tiende a bajar. Mientras que al disminuir el valor del ciclo de trabajo el convertidor se comporta como reductor. Con lo cual se obtiene un valor aproximado de 0.6 veces el valor de entrada. Además para comprobar cuanto afecta el ciclo de trabajo en la tabla 4. Se han tomado datos a cambios de ciclo de trabajo en pasos de uno.

Tabla 5: Buck Boost con ciclo de trabajo pasó de uno

Dutty	Entrada			Salida		Eficiencia	Ganancia V	Ganancia I	
	Vin	Iin	Pin	Vout	Iout	Pout	Pout/Pin	Vout/Vin	Iout/Iin
40.00	60.00	0.22	13.20	39.08	0.25	9.77	0.74	0.65	1.14
41.00	60.00	0.24	14.40	40.72	0.26	10.59	0.74	0.68	1.08
42.00	60.00	0.26	15.60	42.40	0.27	11.45	0.73	0.71	1.04
43.00	60.00	0.28	16.80	44.20	0.28	12.38	0.74	0.74	1.00
44.00	60.00	0.30	18.00	45.90	0.29	13.31	0.74	0.77	0.97
45.00	60.00	0.33	19.80	47.80	0.30	14.34	0.72	0.80	0.91
46.00	60.00	0.35	21.00	49.80	0.31	15.44	0.74	0.83	0.89
47.00	60.00	0.38	22.80	51.80	0.33	17.09	0.75	0.86	0.87
48.00	60.00	0.41	24.60	53.90	0.34	18.33	0.74	0.90	0.83
49.00	60.00	0.44	26.40	56.00	0.35	19.60	0.74	0.93	0.80
50.00	60.00	0.47	28.20	57.80	0.36	20.81	0.74	0.96	0.77
51.00	60.00	0.51	30.60	60.60	0.38	23.03	0.75	1.01	0.75
52.00	60.00	0.55	33.00	63.00	0.40	25.20	0.76	1.05	0.73
53.00	60.00	0.60	36.00	65.50	0.41	26.86	0.75	1.09	0.68
54.00	60.00	0.64	38.40	68.10	0.43	29.28	0.76	1.14	0.67
55.00	60.00	0.70	42.00	70.80	0.45	31.86	0.76	1.18	0.64
56.00	60.00	0.75	45.00	73.60	0.46	33.86	0.75	1.23	0.61
57.00	60.00	0.81	48.60	76.40	0.48	36.67	0.75	1.27	0.59
58.00	60.00	0.87	52.20	79.40	0.50	39.70	0.76	1.32	0.57
59.00	60.00	0.94	56.40	82.50	0.52	42.90	0.76	1.38	0.55
60.00	60.00	1.02	61.20	85.70	0.54	46.28	0.76	1.43	0.53

En la tabla 4 se notará qué por cada punto de ciclo de trabajo se ve el aumento o la reducción de aproximadamente 3 [V] con respecto al valor que le precede en la salida.

4.1.2. Buck Boost sin Carga

El convertidor se ha probado con los anteriores valores para poder definir los cambios que se han presentado con esta prueba

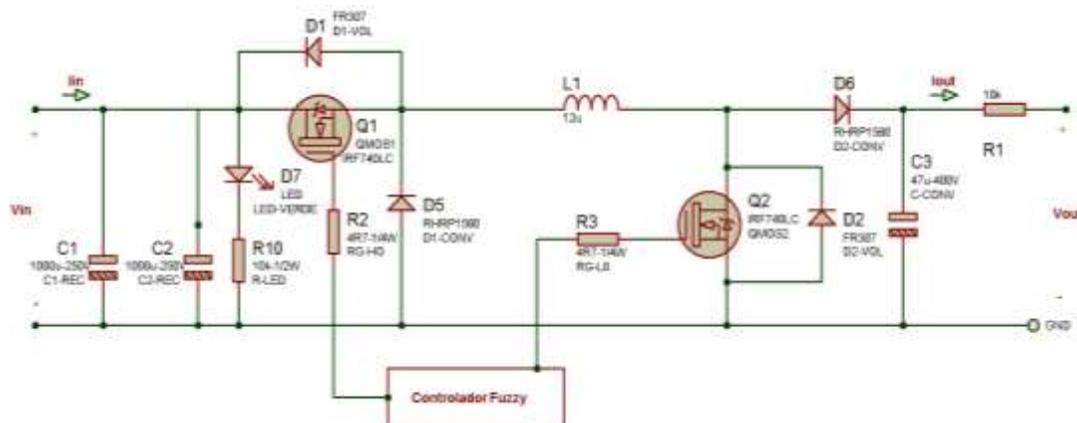


Figura 54 Circuito Buck Boost

Tabla 6: Buck Boost sin Carga

Vin	Fuente		Salida			Dutty	Ganancia P	Ganancia V	Ganancia I
	In	Pin	Vout	Iout	Pout	%	Pi/Pout	Vi/Vout	Iin/Iout
20	0.06	1.2	28.74	0.02	0.57	40	0.48	1.44	0.33
	0.09	1.8	36.73	0.03	1.1	50	0.61	1.84	0.33
	0.13	2.6	44.4	0.04	1.78	60	0.68	2.22	0.31
30	0.08	2.4	43.6	0.04	1.74	40	0.73	1.45	0.5
	0.13	3.9	54.7	0.05	2.74	50	0.7	1.82	0.38
	0.18	5.4	65.6	0.06	3.94	60	0.73	2.19	0.33
40	0.11	4.4	58.4	0.05	2.92	40	0.66	1.46	0.45
	0.16	6.4	72.4	0.06	4.34	50	0.68	1.81	0.38
	0.23	9.2	86.6	0.08	6.93	60	0.75	2.17	0.35
50	0.13	6.5	72.4	0.06	4.34	40	0.67	1.45	0.46

Continúa →

	0.2	10	89.4	0.08	7.15	50	0.72	1.79	0.4
	0.28	14	107.1	0.1	10.71	60	0.77	2.14	0.36
	0.15	9	86.1	0.08	6.89	40	0.77	1.44	0.53
60	0.23	13.8	106.2	0.1	10.62	50	0.77	1.77	0.43
	0.33	19.8	124.4	0.12	14.93	60	0.75	2.07	0.36

En la tabla 1.3. El conversor genera altos valores de voltaje pero bajos de corriente tratando de mantener así el principio de conservación de energía.

Esto se debe al no existir una carga la cual está encargada de limitar la corriente la cual obliga al conversor a elevar los valores de voltaje para compensar dichas corrientes.

4.1.3. Perdida de los Mosfets

Mosfets Ideal

Características de un Mosfets Ideal:

- En estado de conducción la corriente debería poder ser ilimitada, y no debería de presentar ninguna caída de voltaje.
- En estado de no conducción, el interruptor debería poder soportar cualquier voltaje, con una impedancia infinita de modo que no pudiera pasar cantidad de corriente alguna.
- Sin importar la frecuencia a la que conmutara, el tiempo de cambio de estado debería ser cero.

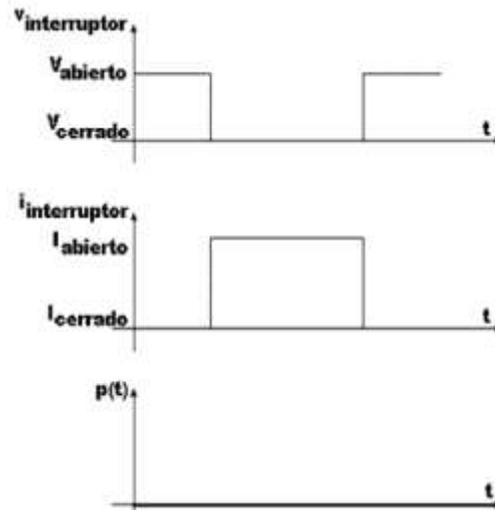


Figura 55: Mosfet Ideal

Mosfets Real

Sin embargo, para un Mosfet real, sí hay una limitante en corriente, en voltaje y en frecuencia, del mismo modo que sí hay un ligero paso de corriente en el estado de no conducción, sí hay una caída de voltaje en el estado de conducción y el tiempo de cambio de estado no es cero. Por lo tanto, se puede inferir, que sí hay pérdidas de potencia. Existen dos tipos de pérdidas: en conmutación y por conducción, como se muestra en la figura 50.

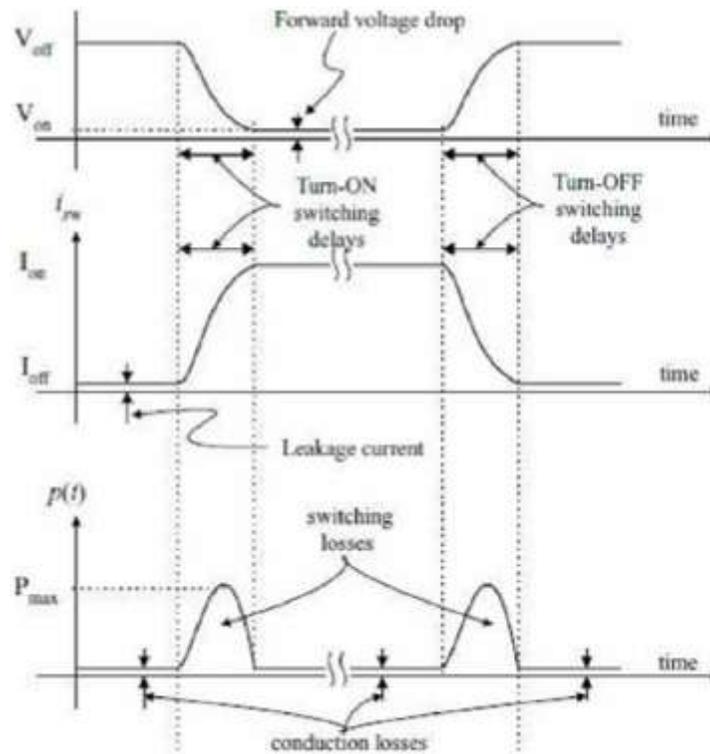


Figura 56: Mosfet Real

Fuente: (Sanfelin, 1998)

Las pérdidas se generan debido a que al compartir los Mosfets la misma señal de encendidos estos idealmente deben encenderse y apagarse al mismo tiempo. Ver la figura 52 Otra razón es debido a la utilización del circuito integrado TLP250 el cual no posee control de tiempos muertos para evitar el cruce de la señal.

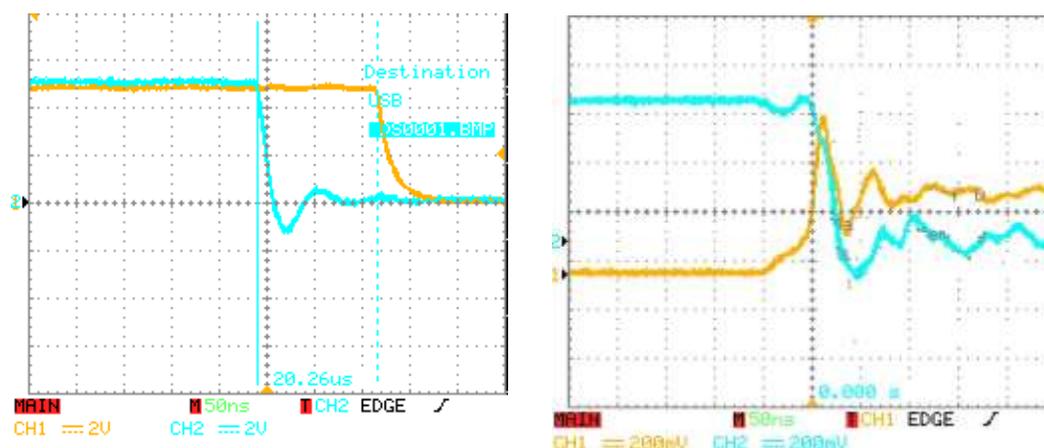


Figura 57: Pérdidas

Para solucionar este problema se mejorará el programa, debido a que la primera versión del mismo generaba demasiadas pérdidas ya que este redondeaba los valores del ciclo de trabajo con lo cual se perdía resolución del PWM del Pic. Para esto se tuvo que cambiar las reglas de salida del controlador Fuzzy, además será necesario de trabajar con los valores crudos y dejar de redondearlos.

Esto ayudo a que las señales se sincronizaran mucho mejor con lo cual disminuyeron notablemente las pérdidas ver figura 60. Incluso llegando a reducir el tamaño de los disipadores de los Mosfets

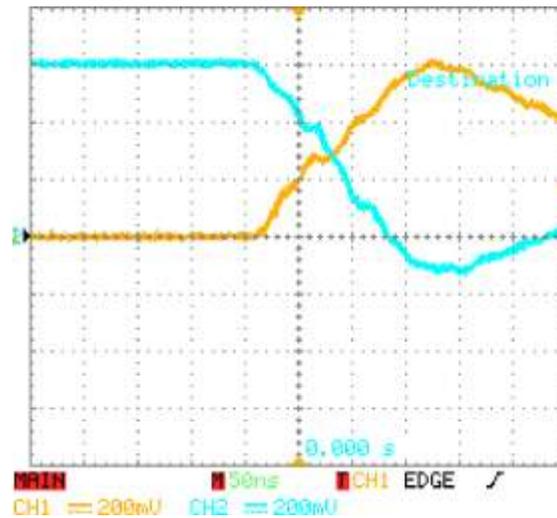


Figura 58: Corrección de las Pérdidas.

4.2. Puente H

Para el análisis del Puente H se vio en la necesidad de trabajar con el conjunto balastro-lámpara, debido a que es necesario determinar la potencia neta en la lámpara, así como el de obtener el valor de la resistencia que se colocara en serie con la lámpara la misma que facilitar su encendido.

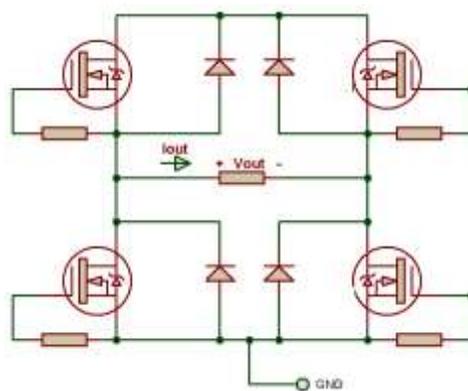


Figura 59: Puente H

Uno de los primeros pasos es el determinar cuanta potencia entrega todo el balastro. Para ello se ha fijado una frecuencia de trabajo y se procede a cambiar el ciclo de trabajo del Buck-Boost ver tabla 6

Tabla 7 Valores Puente H

Frecuencia [kHz]	Ciclo de Trabajo [%]	Iout [A]	Vout [V]	Potencia [W]
117.00	52.00	0.67	201.00	134.67
117.00	52.40	0.73	204.00	148.92
117.00	52.80	0.77	207.00	159.39
117.00	53.20	0.81	210.00	170.10
117.00	53.60	0.85	213.00	181.05
117.00	54.00	0.88	216.00	190.08
117.00	54.40	0.90	219.00	197.10
117.00	54.80	0.92	222.00	204.24
117.00	55.20	0.94	223.10	209.71
117.00	55.60	0.97	226.60	219.80
117.00	56.00	1.01	230.40	232.70
117.00	56.40	1.02	233.90	238.57
117.00	56.80	1.04	236.90	246.37
117.00	57.20	1.05	239.90	251.89
117.00	57.60	1.07	242.90	259.90

Una vez que se ha determinado los valores de potencia que el balastro entrega. El siguiente paso es determinar cuál es el mejor valor de la resistencia que ira en serie con la lámpara. Para esto contamos con dos valores de resistencia que son; 30 ohm y 20ohm

Los factores que determinarán que valor de resistencia será utilizado son los siguientes:

- Facilidad para el encendido de la lámpara.

- Potencia neta en la lámpara.

Lámpara con una resistencia de 30 ohm ver tabla 7

Tabla 8: Puente H con resistencia de 30 ohm

Frecuencia [kHz]	Ciclo de Trabajo [%]	Potencia [W]	Potencia Lámpara [W]
117.00	52.00	134.67	114.57
117.00	52.40	148.92	127.02
117.00	52.80	159.39	136.29
117.00	53.20	170.10	145.80
117.00	53.60	181.05	155.55
117.00	54.00	190.08	163.68
117.00	54.40	197.10	170.10
117.00	54.80	204.24	176.64
117.00	55.20	209.71	181.51
117.00	55.60	219.80	190.70
117.00	56.00	232.70	202.40
117.00	56.40	238.58	207.97
117.00	56.80	246.38	215.17
117.00	57.20	251.90	220.39
117.00	57.60	259.90	227.80

Al final se ha determinado que con la resistencia de 30 ohm. El encendido se nota un pequeño parpadeo. Esto se debe a que en la resistencia hay una pérdida de 30 W con lo cual la lámpara demora en su encendido. Mientras que el valor de potencia neta es de 227 W que aproximadamente traducido a lúmenes son 16800 lm con lo cual la lámpara no entrega su máximo valor de luminiscencia

Lámpara con una resistencia de 20 ohm ver tabla:

Tabla 9: Puente H con resistencia de 20 ohm

Frecuencia [kHz]	Ciclo de Trabajo [%]	Potencia [W]	Potencia Lámpara [W]
117.00	52.00	134.67	121.27
117.00	52.40	148.92	134.32
117.00	52.80	159.39	143.99
117.00	53.20	170.10	153.90
117.00	53.60	181.05	164.05
117.00	54.00	190.08	172.48
117.00	54.40	197.10	179.10
117.00	54.80	204.24	185.84
117.00	55.20	209.71	190.91
117.00	55.60	219.80	200.40
117.00	56.00	232.70	212.50
117.00	56.40	238.58	218.18
117.00	56.80	246.38	225.58
117.00	57.20	251.90	230.90
117.00	57.60	259.90	238.50

Al final se ha determinado que con la resistencia de 20 ohm. El encendido se nota un pequeño parpadeo. Esto se debe a que en la resistencia hay una pérdida de 20 W con lo cual la lámpara demora en su encendido. Mientras que el valor de potencia neta es de 240 W que aproximadamente traducido a lúmenes son 17800 lm con lo cual la lámpara casi llega a su máximo valor de luminiscencia que es 18000 lm

4.3 Formas De Onda Del Balastro Implementado

4.4.1 Salida del Balastro

A continuación se presenta la señal de la última etapa del balastro que es el conversor CD/CA (Puente H) que es ver figura 61.

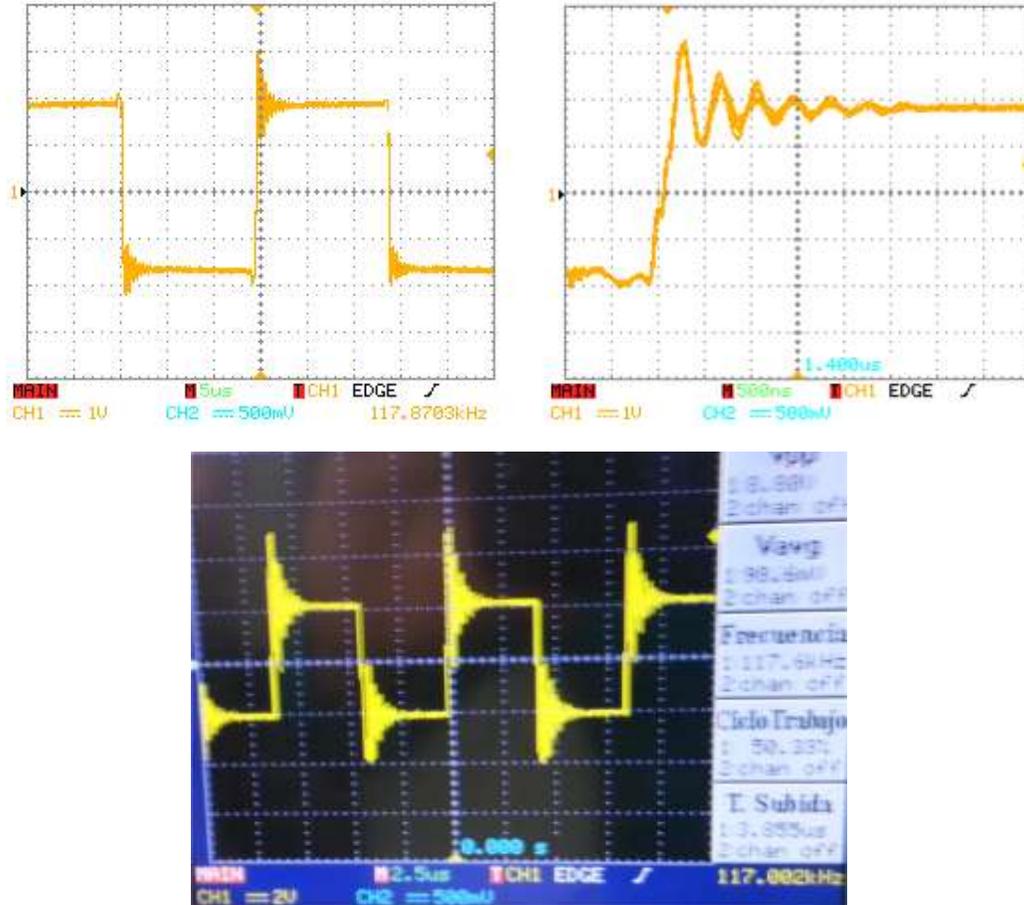


Figura 60: Señal de Salida del Puesto H

En la señal de salida se nota como la acción proporcional de controlador Fuzzy hace que presente una respuesta oscilante amortiguada. No solo en la parte positiva sino también en la parte negativa de la señal. Una de las características es que las oscilaciones van decreciendo en un 25% con respecto a la anterior, pero el error en estado estacionario no es cero su valor está entre el 2% y el 5% de su valor final.

4.4.1 Conversor Buck-Boost Sin Señal de Control

Para comprobar tanto la simulación como la funcionalidad del controlador. Al conversor se le asignó un valor fijo de ciclo de trabajo del 51% y se lo sometió a perturbaciones de 10V en el voltaje de alimentación.

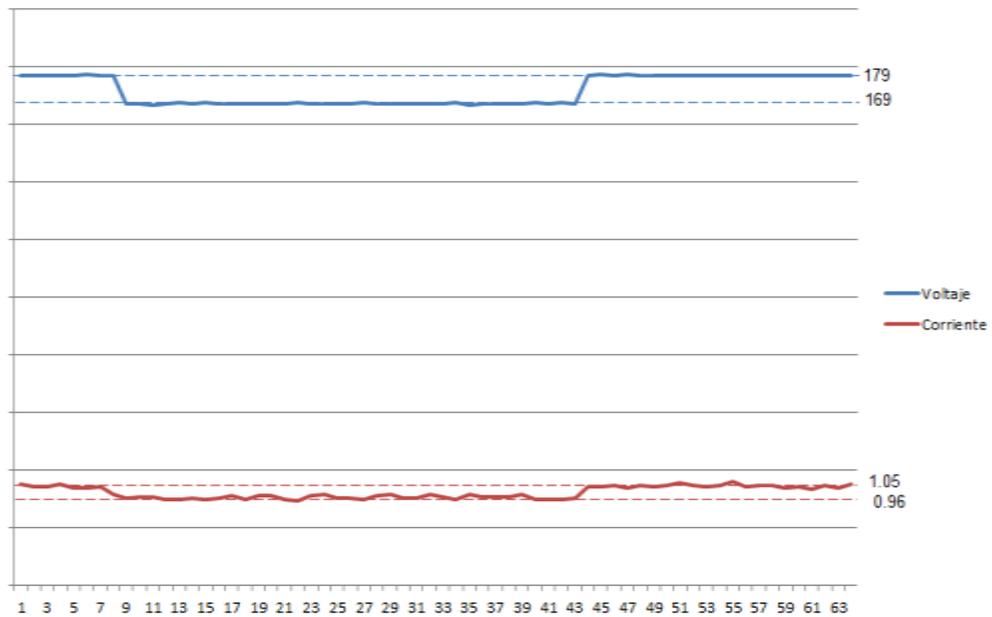


Figura 61: Buck-Boost Sin Señal de Control

En la figura 62 notamos que el conversor al ser sometido a perturbaciones de voltaje, la corriente tiende a seguir dichas perturbaciones, es decir, que si el voltaje de alimentación aumenta, la corriente también lo hace.

Esto se debe a que el valor del ciclo de trabajo es fijo y no compensa dichas perturbaciones, que para este caso elevan tanto el voltaje como la corriente de salida, permitiendo que la lámpara sufra de resonancias acústicas que se traducen en parpadeos de la misma.

4.4.2 Conversor Buck-Boost Con Señal de Control

Como se pudo ver el conversor necesita una señal de control la cual garantice que la corriente sea lo más constante posible ya que esta evitara que la lámpara sufra de resonancias acústicas. Para lo cual se ha puesto en funcionamiento el controlador y se lo sometió a las mismas perturbaciones.

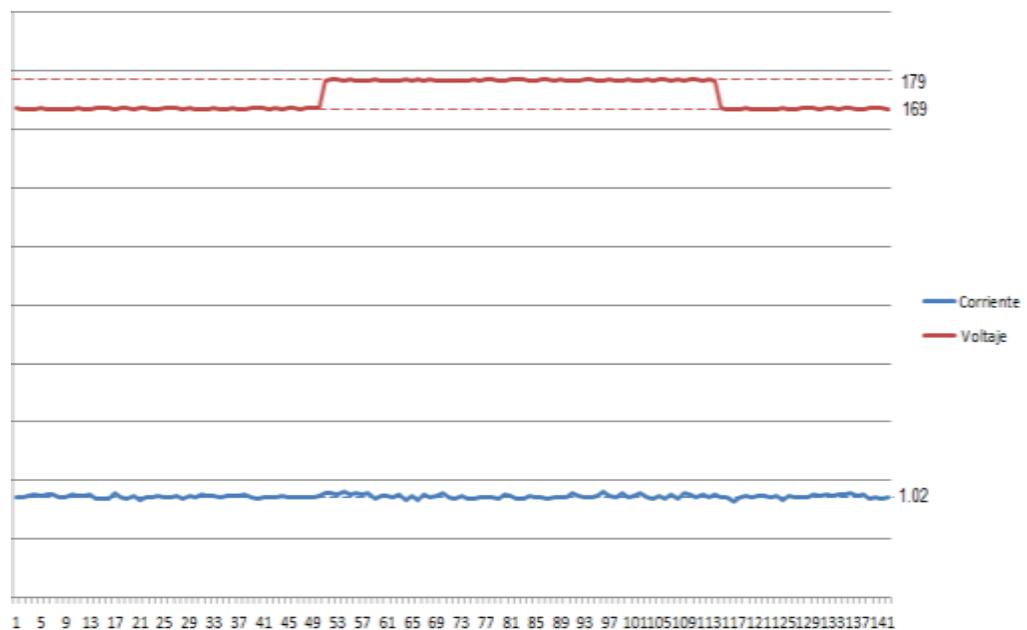


Figura 62: Puente H

En la figura 63 notamos que el conversor al ser sometido a una perturbación de voltaje, está ya no se ven reflejada en la corriente de salida. Esto se debe a que el valor del ciclo de trabajo ya no es fijo sino que este busca compensar dicha perturbación, ya sea aumentando o reduciendo su valor.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se logró la implementación del balastro electrónico a través de la utilización de dos convertidores de un CA/CD y un CD/CA. Esto se debe a que este tipo de convertidores permiten modificar el voltaje y la corriente de manera eficiente siendo una solución robusta y fiable.
- El balastro al estar constituido por dos convertidores necesitó la generación de dos señales. La señal proveniente del control Fuzzy será aplicada al

Buck-Boost mientras que al Puente H se generara una señal fija. Esto se debe a que en la etapa de experimentación el Puente H está encargado de generar la onda cuadrada de potencia por lo cual solo necesita un valor fijo de frecuencia para su funcionamiento. Mientras que el Buck-Boost es el encargado de suplir el voltaje así como de la corriente y es por ello que necesita un control para mantener estos valores lo más constante posible.

- Al aplicar la señal de control al Buck-Boost se logró mantener la corriente en un valor deseado que es de 1 A. Para ello se decidió emplear un control Proporcional Fuzzy ya que este disminuía en gran medida que la lámpara se vea afectada por la resonancia acústica acosta de tener un ess de 2% el cual es aceptable. Las otras técnicas de control disminuían el ess pero volvían a la lámpara muy susceptible a la resonancia acústica lo cual afectaba a la estabilidad del plasma, haciendo que la lámpara parpadee.
- La identificación y cuantificación de las reglas difusas que tienen correspondencia con la dinámica de la planta física han sido esenciales en la generación de un algoritmo de control apropiado.
- El controlador actúa de manera totalmente predecible y además es posible conocer el estado del sistema en cualquier momento, esto se debe a las

definiciones utilizadas en las bases de conocimiento y en las funciones de pertenencia.

- El controlador difuso implementado ha sido una alternativa robusta y flexible de control para el conjunto balastro-lámpara ya que esta permite una fácil adaptación a nuevos problemas, ahorrando tiempo de desarrollo del mismo.

Recomendaciones

- Para el caso del controlador se recomienda para futuros proyectos utilizar un DSPIC30f2020 este micro controlador es especializado para el control de convertidores.
- Se recomienda que al momento de diseñar el controlador Fuzzy se cambien los bordes de las funciones de pertenencia para ver cómo esta variación afecta al control y como este puede mejorar o empeorar al controlador.
- Al momento de energizar el circuito de control y el circuito de potencia se deben utilizar fuentes independientes al no hacerlo la etapa de potencia induce ruido hacia la de control dificultando el funcionamiento del balastro.
- Para pruebas y experimentación se deben utilizar capacitores mayores o iguales a 400 voltios para evitar destrucción de los mismos, esto se aplicó al

momento de realizar variaciones en la alimentación para probar el controlador.

Bibliografía General

- Douriet, E. D. (2005). *Caracterización de lámparas de alta intensidad de descarga alimentadas con formas de onda cuadradas*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET.
- Gómez, J. C. (2004). *ESTRATEGIAS DE CONTROL EN LÁMPARAS DE ALTA PRESIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE RESONANCIAS ACÚSTICAS*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET.
- Hernández, R. F. (2007). *MODELADO DINÁMICO DE LÁMPARAS DE ALTA INTENSIDAD DE DESCARGA*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET.
- Kevin M. Passino, S. Y. (1998). *Fuzzy Control*. Wesley Longman.
- Márquez, M. B. (2003). *APLICACIÓN DE UN MICROCONTROLADOR PARA LA ELIMINACIÓN DE RESONANCIAS ACÚSTICAS EN LÁMPARAS DE ALTA PRESIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN EN FRECUENCIA*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET.
- Piña, A. J. (2009). *Síntesis de Sistemas de Control Borroso Estable por Diseño*. Huelva: Universidad de Huelva.

Sanfelin, G. G. (1998). *Conversores Comutados: Circuitos de Potencia y Control*.

Valencia: Servicios de Publicaciones Universidad Politecnica de Valencia.

Senen Barro Ameneiro, A. J. (2002). *Fronteras de la Computacion*. Dias de Santos.

Tapia, J. A. (2011). *Balastro Electrónico para Lámparas de Alta Intensidad de Descarga Alimentadas con Formas de Ondas Cuasi-Cuadradas*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET.

ACTA DE ENTREGA

El proyecto fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, desde:

Sangolquí, _____ de 2014

ELABORADO POR:

Giovanny Fernando Regalado Basantes
171137315-7

Néstor David Villacis Díaz

171233135-2

AUTORIDAD

Ing. Luis Orozco MSc.
DIRECTOR DE LA CARRERA DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL