



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
CONTROL ADAPTATIVO - PREDICTIVO BASADO EN
MODELO PARA UN BALASTO ELECTRÓNICO PARA
UNA LÁMPARA HID-MH**

**AUTORES: DIANA CAROLINA PASACA GUERRERO
NATHALIE ALEXANDRA PÉREZ GOYES**

**DIRECTOR: ING. PAÚL AYALA
CODIRECTOR: ING. LUIS OROZCO**

SANGOLQUÍ, MARZO 2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

CERTIFICADO

Ing. Paúl Ayala

Ing. Luis Orozco

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado "Diseño e implementación de un Control Adaptativo - Predictivo Basado en Modelo para un Balasto Electrónico para una Lámpara HID-MH", realizado por las señoritas Diana Carolina Pasaca Guerrero y Nathalie Alexandra Pérez Goyes, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

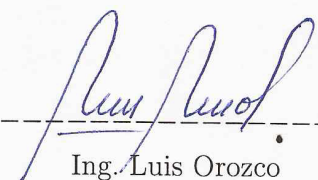
Debido a que se trata de un trabajo de investigación se recomienda su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a las señoritas Diana Carolina Pasaca Guerrero y Nathalie Alexandra Pérez Goyes que entreguen al Ingeniero Luis Orozco en su calidad de Coordinador de la Carrera.

Sangolquí, Marzo del 2015



Ing. Paúl Ayala
DIRECTOR



Ing. Luis Orozco
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

DIANA CAROLINA PASACA GUERRERO

NATHALIE ALEXANDRA PÉREZ GOYES

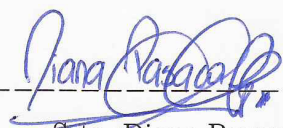
DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado "*Diseño e implementación de un Control Adaptativo - Predictivo Basado en Modelo para un Balasto Electrónico para una Lámpara HID-MH*", ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, 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, Marzo del 2015



Srita. Diana Pasaca



Srita. Nathalie Pérez

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN

Nosotras Diana Carolina Pasaca Guerrero y Nathalie Alexandra Pérez Goyes 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 Adaptativo - Predictivo Basado en Modelo para un Balasto Electrónico para una Lámpara HID-MH*", cuyo contenido ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Marzo del 2015



Srta. Diana Pasaca



Srta. Nathalie Pérez

DEDICATORIA

A mi familia por el apoyo incondicional y sobre todo a mis padres que sin su esfuerzo y sacrificio yo no podría culminar esta etapa de mi vida.

Diana Pasaca

DEDICATORIA

A mi abuelito, Papi Tomás, quién partió de este mundo dejándome maravillosos recuerdos y un gran ejemplo de lucha. Hoy bailamos Papi tú en el cielo y yo en la tierra para festejar este triunfo.

A mi madre, Carmen, ya que mis logros son el fiel reflejo de todo lo que ha sembrado en mí.

Nathalie Pérez

AGRADECIMIENTO

A mis padres por su apoyo en cada etapa de mi vida, por guiarme con amor y comprensión, por enseñarme que en la vida con esfuerzo y trabajo todo se consigue, gracias por que por ustedes soy la persona que soy hoy en día.

A mis hermanos por su paciencia, cariño y apoyo.

A mis amigos que me han acompañado durante esta etapa, algunos desde el inicio de la universidad, otros que encontré con el pasar del tiempo, siempre tendré gratos recuerdos vividos a su lado, simplemente son personas maravillosas que siempre recordaré con cariño, en especial a Irvin y Edison, gracias por su apoyo y la amistad forjada durante este proyecto. Gracias a todos por hacer de esta una de las mejores etapas de mi vida.

A mi amiga y compañera en este trabajo Nathie, gracias por estos años de amistad, por acompañarme en las buenas y en las malas, por los consejos y sobre todo por el esfuerzo para la realización de este proyecto.

Y un agradecimiento especial al Ing. Paúl Ayala y al Ing. Luis Orozco por el apoyo y los conocimientos impartidos para la elaboración de este proyecto.

Diana Pasaca

AGRADECIMIENTO

A Dios, quién guío mis pasos y me ha dado fuerza para seguir adelante sin flaquear ante las adversidades del día a día.

A mi madre, Carmen, quién más que mi madre es mi amiga, mi consejera y la razón de mi vida; sin ella no habría culminado esta etapa de mi vida.

A mi padre, Alcides, por todo su apoyo durante el período universitario.

A mi abuelita, tíos, tías, hermana, primos y primas quienes se han preocupado de mí desde el momento que llegué a este mundo, gracias por ser un pilar fundamental en mi crecimiento personal y profesional.

A mi novio, Nebo, quién ha sido mi compañero durante este tiempo brindándome palabras de aliento sin dejarme desmayar.

A mis amigos Diana, Edison e Irvin gracias por permitirme crear una gran amistad con ustedes, ha sido una experiencia única compartir conocimiento, satisfacciones y penas con personas tan especiales para mí.

Al Ing. Paúl Ayala y al Ing. Luis Orozco quienes me impartieron su conocimiento y caminaron a mi lado durante el desarrollo de este proyecto.

Nathalie Pérez

Índice general

CERTIFICADO	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	VI
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia	2
1.3 Alcance del Proyecto	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 General	3
1.4.2 Específicos	3

CAPÍTULO 2	5
ESTUDIO DEL ARTE	5
2.1 Lámpara de Alta Intensidad de Descarga (HID)	5
2.1.1 Conceptos Generales	5
2.1.2 Clasificación de las Lámparas de Alta Intensidad de Descarga (HID)	6
2.1.3 El Balasto	8
2.1.4 Fenómeno de Resonancias Acústicas	9
2.2 Modelado e Identificación de un Sistema Dinámico	12
2.2.1 Modelo de Sistemas	12
2.2.2 Modelado de Sistemas	14
2.3 Control Adaptativo - Predictivo	18
2.3.1 Estrategia del MPC	20
2.3.2 Elementos Básicos del MPC	22
2.3.3 Revisión de los principales algoritmos	29
CAPÍTULO 3	33
DISEÑO DEL CONTROL ADAPTATIVO - PREDICTIVO	33
3.1 Modelo e Identificación del sistema Balasto-Lámpara	33
3.2 Diseño del Controlador	38
3.3 Simulación del Sistema de Control	44
CAPÍTULO 4	46
IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA	46
4.1 Etapas del Balasto Electrónico	46
4.1.1 Convertidor AC/DC	46
4.1.2 Convertidor DC/DC	47

	X
4.1.3	Convertidor DC/AC 50
4.1.4	Etapa de Sensado 52
4.1.5	Etapa de Control 56
4.1.6	Circuitos Adicionales 59
4.2	Pruebas del Sistema y Análisis de Resultados 62
4.2.1	Modelo Matemático del Sistema Balasto - Lámpara . . . 63
4.2.2	Controlador del Sistema Balasto Electrónico - Lámpara HID - MH 64
CAPÍTULO 5	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1	Conclusiones. 66
5.2	Recomendaciones. 67
Bibliografía	68
ANEXO A	A
CIRCUITOS IMPRESOS	A
ANEXO B	B
DATOS DE IDENTIFICACIÓN	B
ANEXO C	C
ALGORITMOS	C
ANEXO E	D
HOJAS TÉCNICAS	D

	XI
ANEXO D	E
CÁLCULOS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST	E
ACTA DE ENTREGA	F

Índice de Figuras

1.	Estructura Física de las Lámparas HID-MH	6
2.	Clasificación de las Lámparas de Descarga	7
3.	Balasto	8
4.	Tipos de Deformaciones del Arco de Descarga Causado por las Diferentes Resonancias Acústicas	11
5.	Estrategia del MPC	20
6.	Estructura del MPC	22
7.	Respuesta al Escalón del Sistema	24
8.	Estructura CARIMA	26
9.	Respuesta Libre y Respuesta Forzada.	27
10.	Señal Binaria Pseudo Aleatoria (SBPA)	35
11.	Obtención de Muestras para el Cálculo del Valor Medio	36
12.	Porcentaje de Identificación del Sistema (Ident - MATLAB)	38
13.	Respuesta al Escalón del Sistema Balasto - Lámpara Identificado	39
14.	Ley de Control del GPC	44
15.	Señal de Salida del Sistema Balasto-Lámpara Controlado y Tra- yectoria de Referencia	45
16.	Señal de Control del Sistema Balasto-Lámpara	45
17.	Diagrama de Bloques	46
18.	Circuito Esquemático del Convertidor AC/DC	47

19.	Circuito Esquemático de Potencia del Convertidor Buck Boost . . .	48
20.	Circuito Esquemático de Activación de MOSFETS	49
21.	Circuito Esquemático de Control del convertidor Buck Boost . . .	50
22.	Circuito Esquemático de Control del Puente H	51
23.	Circuito Esquemático de Puente H	52
24.	Circuito Punta Diferencial	53
25.	Circuito Acondicionamiento Punta Diferencial - AVR	54
26.	Circuito de Sensado	55
27.	Tarjeta STM32F4 - Discovery	57
28.	Diagrama de Flujo del Control Adaptativo - Predictivo	58
29.	Circuito Esquemático para la Tarjeta STM32F4 Discovery	59
30.	Circuito Esquemático de Fuentes de Alimentación	60
31.	Circuito de Arranque	61
32.	Balasto Electrónico Implementado para la Lámpara HID - MH . .	62
33.	Datos Tensión Simulados vs Datos Tensión Reales	63
34.	Respuesta al Escalón de la Planta Sin Control	64
35.	Respuesta al Escalón de la Planta Controlada	65

Índice de Cuadros

1.	Coeficientes para generación de la señal SBPA [1]	16
2.	Representación de la Señal Binaria en Ciclo de Trabajo	35

RESUMEN

El presente documento contiene la información acerca del desarrollo e implementación de un control adaptativo - predictivo para un balasto electrónico de una lámpara HID – MH de 250 W. El tratamiento de este tema de investigación comienza con el hecho de que las lámparas HID-MH trabajan de forma lineal a frecuencias altas; es decir, mayores a 1 kHz por lo tanto se establece la frecuencia de operación en 31 kHz. El principal problema de funcionamiento de dichas lámparas es la presencia de resonancias acústicas, las cuales desgastan rápidamente a la lámpara disminuyendo su vida útil; la solución que se presenta es la aplicación de una técnica de control que permite mantener la potencia de consumo de la lámpara en 250 W, evitando así la presencia de las resonancias acústicas. El sistema balasto – lámpara requiere ser identificado para conocer su comportamiento ante una señal de excitación, que en este caso es una señal binaria pseudoaleatoria (SBPA), la misma que ha sido diseñada de tal manera que excite todas las dinámicas del sistema. Como resultado de la identificación se obtiene un modelo matemático que describe su funcionamiento; este modelo presentado como función de transferencia es la base para el cálculo y desarrollo del control predictivo generalizado. El control predictivo generalizado (GPC) es el encargado de generar una señal de control que permita a la tensión de salida alcanzar el valor deseado tomando en cuenta las entradas y salidas pasadas del sistema. Este control predice las salidas futuras de tal manera que las corrige previamente.

Palabras Claves: LÁMPARA HID-MH, BALASTO ELECTRÓNICO, RESONANCIAS ACÚSTICAS, CONTROL, IDENTIFICACIÓN, MODELO MATEMÁTICO.

ABSTRACT

The present document contains the information about the development and the implementation of an adaptive – predictive control for an electronic ballast of an HID-MH lamp of 250 W. The treatment of this investigative theme begins with the fact that the HID-MH lamp works in a lineal form at high frequencies, it means, higher than 10 kHz therefore the operation frequency is setting in 31 kHz. The main problem of these lamps is the presence of acoustic resonances, this wear out the lamp reducing its life time; the solution presented is the application of a control technique that allows to maintain the lamp consumption power in 250 W, avoiding the presence of acoustic resonances. The system ballast – lamp requires to be identified to know its behavior in presence of an excitation signal, in this case is a pseudoaleatorie binary signal (PRBS), the one that has been designed to excite all the dynamics of the system. As result of the identification it obtains a mathematic model that describes its functioning; this model presented as a transfer function is the base for the calculation and development of the generalized predictive control. The Generalized Predictive Control (GPC) is in charge of generate a control signal that allows to the out tension reach the setpoint by taking the past ins and outs of the system. This control predicts the future outs and it correct them previously.

Keywords: HID-MH LAMP, ELECTRONIC BALLAST, IDENTIFICATION, MATHEMATICAL MODEL, ACOUSTIC RESONANCES, CONTROL.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las lámparas de alta intensidad de descarga, HID por sus siglas en inglés, se caracterizan por proveer 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 [2].

El fenómeno de las resonancias acústicas en lámparas de alta intensidad consiste básicamente en ondas de presión del gas de relleno, que 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 ocasionan roturas [3]. Por lo cual es necesario un control para la disminución de este fenómeno.

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 o cuasi cuadradas.

Una forma efectiva para eliminar las resonancias acústicas en lámparas HID es alimentarlas con formas de ondas cuadradas [4]. 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 utiliza un control adaptativo - predictivo implementado en un balasto electrónico. Así mismo estos balastos son robustos ante cambios en la tensión de

entrada y ante las variaciones en los parámetros de los balastos y/o la lámpara [4]. Este proyecto es de tipo investigativo y será un aporte para el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE dado que va a permitir demostrar la implementación de un control adaptativo - predictivo para un balasto de una lámpara HID – MH.

1.2 Justificación e Importancia

La energía eléctrica que se genera a nivel mundial es repartida para distintas aplicaciones, entre ellas la iluminación interior y exterior, ocupando un 25 % de dicha energía en la actualidad [5]. Existen distintos tipos de lámpara que se utilizan como fuentes de luz, las lámparas HID - MH 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 color, elevada temperatura de color y elevado tiempo de vida. Estas lámparas son usadas con balastos electromagnéticos, los mismos que son voluminosos, pesados e imposibilitan el control de la potencia de la lámpara, siendo el objetivo la creación de un balasto electrónico que supere al balasto convencional. Finalmente la implementación de un controlador adaptativo en línea para un balasto electrónico de una lámpara HID - MH optimizará el desempeño y la vida útil, al igual que reducirá el efecto de resonancias acústicas que se provoca en dicha lámpara. Se obtendrá una reducción en el ennegrecimiento del tubo, una mayor estabilidad del color en la descarga y aumento de las horas de vida de la lámpara.

1.3 Alcance del Proyecto

En el presente proyecto se realiza el modelado y la identificación de los parámetros de la planta Balasto-Lámpara.

Se pretende diseñar e implementar un controlador adaptativo - predictivo basado en modelo paramétrico para el comportamiento dinámico de la planta balasto-lámpara, esto bajo la premisa de proveer una corriente constante a la lámpara, siendo la variable a manipular la tensión de esta, con lo cual se pretende obtener un control indirecto sobre la impedancia de la misma. Al mantener la

impedancia de la lámpara en su mínimo, se pretende eliminar la existencia de resonancias acústicas, para el mejoramiento de las especificaciones de la lámpara como son: el tiempo de vida, intensidad luminosa, eliminación de la intermitencia luminiscente, entre otras.

Gracias a la robustez del sistema dado por el controlador se desea obtener cierta inmunidad en la lámpara frente a las variaciones de la tensión de red, la que habitualmente produce un deterioro en los parámetros de esta o su destrucción.

Una vez diseñado el controlador se simulará el sistema de control, de tal manera que al obtener un resultado satisfactorio en dichas simulaciones, se procederá con la implementación de un balasto electrónico.

Se prevé que el balasto electrónico constará de las siguientes etapas: potencia, sensado, sistema de control y encendido.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Diseñar e implementar un controlador adaptativo - predictivo basado en modelo para una lámpara HID - MH de 250W.

1.4.2 Específicos

- Modelar e Identificar los parámetros del sistema Balasto – Lámpara.
- Diseñar un controlador adaptativo - predictivo basado en modelo para controlar el comportamiento dinámico de la lámpara con el fin de evitar las resonancias acústicas y mantener la potencia.
- Implementar un controlador adaptativo - predictivo al balasto electrónico de la lámpara HID - MH.
- Contrastar los resultados del comportamiento de la planta sin control frente

a la planta controlada ante una perturbación.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Lámpara de Alta Intensidad de Descarga (HID)

Las lámparas de alta intensidad de descarga ofrecen una gran versatilidad, fiabilidad y eficiencia, por lo cual, actualmente son usadas tanto para la iluminación de espacios exteriores, iluminación pública, al igual que en la industria. Sin embargo es necesario un balasto electrónico ya que la eficiencia de este tipo de lámparas se ha mostrado limitada por el fenómeno de resonancias acústicas que aparecen al hacerlas funcionar en alta frecuencia (>1 kHz).

Las fuentes de alta intensidad de descarga incluyen lámparas de mercurio, aditivos metálicos (HID - MH), sodio de alta presión (HPS) y sodio de baja presión. La luz se produce en las fuentes HID a través de la descarga de un arco gaseoso, usando una variedad de elementos.

La estructura de cada lámpara HID (véase la figura 1), consiste de un tubo que contiene ciertos elementos o mezcla de elementos, que se gasifican y generan una radiación visible cuando se genera un arco eléctrico entre los electrodos.

Algunas de las principales ventajas de las lámparas HID son: su alta eficiencia en lúmenes por vatio y su larga vida. Entre las desventajas se encuentra la necesidad de un balasto para regular la corriente y tensión de la lámpara.

2.1.1 Conceptos Generales

- Flujo Luminoso:

“Es la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa (puede ser una lámpara) en la unidad de tiempo (segundo). La unidad de medida del flujo luminoso es el lumen.” [7]

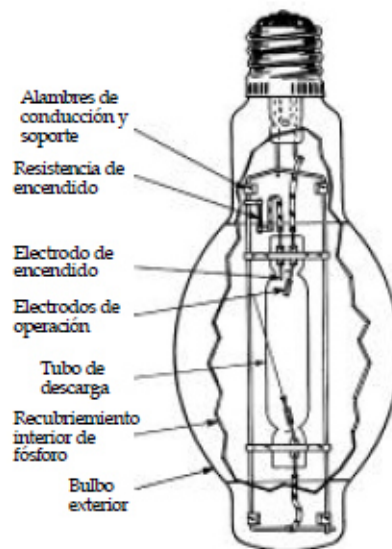


Figura 1: Estructura Física de las Lámparas HID-MH
Fuente: [6]

- Luminiscencia:

“Es el fenómeno que experimentan algunos materiales capaces de absorber energía y de volver a emitirla en forma de luz visible.” [8]

- Electroluminiscencia

“Propiedad por la que las sustancias que contienen determinados componentes, como el fósforo al colocarlas en un campo eléctrico, se excitan y emiten luz.”[9]

- Fotoluminiscencia

“Emisión de luz como consecuencia de la absorción previa de una radiación, como sucede en la fluorescencia y la fosforescencia.”[10]

2.1.2 Clasificación de las Lámparas de Alta Intensidad de Descarga (HID)

Las lámparas de alta intensidad de descarga se clasifican de acuerdo al gas de descarga, como se muestra en la figura 2.

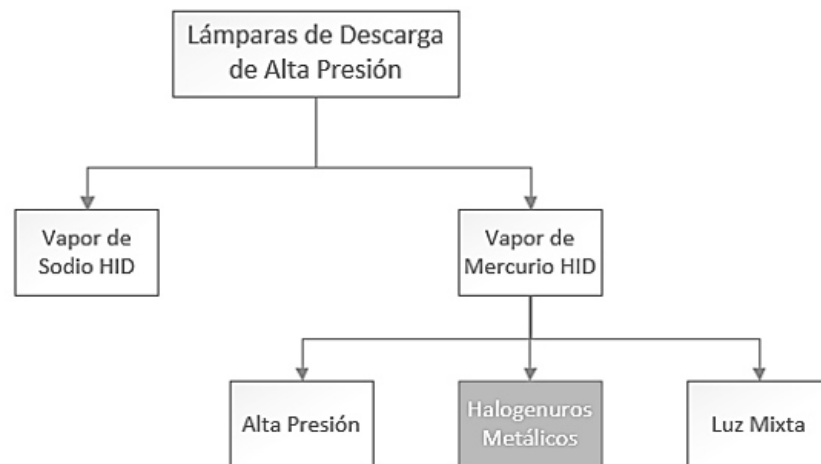


Figura 2: Clasificación de las Lámparas de Descarga

Lámparas de vapor de sodio de alta presión (HPS)

Las lámparas de vapor de sodio de alta presión, son lámparas de descarga que requieren de tiempo para un re-encendido y alcanzar su máxima luminosidad después de una falla en el suministro. Estas lámparas tienen una eficiencia que va desde 80 a 140 lúmenes por vatio, por lo cual estas proveen hasta siete veces más luz por vatio que las incandescentes y cerca del doble que algunas de mercurio o fluorescentes.

Una lámpara HPS también ofrece una vida más larga (24,000 horas) y las mejores características de mantenimiento del flujo luminoso de todas las fuentes HID [11].

Lámparas de vapor de mercurio de alta presión

Las lámparas de vapor de mercurio de alta presión, son lámparas de descarga que se caracterizan por tener un electrodo que tiene como propósito facilitar el proceso de encendido a baja tensión. En este tipo de lámparas la mayoría de las radiaciones están en el espectro visible, a medida que se incrementa la presión del vapor de mercurio en el interior del tubo de descarga, la radiación ultravioleta característica de la lámpara a baja presión, pierde importancia respecto a las emisiones en la zona visible, por lo cual la luz que esta emite es de color azul verdoso, es decir no contiene radiaciones de color rojo [5].

Lámparas HID-MH

La lámpara de halogenuros metálicos es una lámpara de vapor de mercurio a alta presión a la que se han incorporado halogenuros metálicos (Sodio, talio, indio, escandio y disprosio) los cuales consiguen mejorar considerablemente la capacidad de reproducir color y emite luz blanca de alta calidad.

La eficiencia de estas lámparas ronda entre los 65 y 115 lm/W y su vida media es de unas 20.000 a 24.000 horas [5]. Tienen un período de encendido de unos 5 minutos, que es el tiempo necesario hasta que se estabiliza la descarga. Para su funcionamiento es necesario un dispositivo especial (conocido como ignitor que es capaz de emitir un pico alto de tensión), de encendido, puesto que las tensiones de arranque son muy elevadas.

2.1.3 El Balasto

El empleo de este tipo de lámparas requiere de dispositivos especiales de alimentación para su conexión a la red eléctrica, estos dispositivos son los balastos.

El balasto es el circuito que se encarga de limitar y estabilizar la corriente que se suministra a la lámpara para su óptimo funcionamiento (ver Figura 3). Actualmente se emplean balastos electrónicos, los cuales tienen una serie de ventajas en comparación a sus antecesores, ya que cuando se empezaron a usar las lámparas HID se empleaban balastos electromagnéticos, los cuales usan la reactancia inductiva (bobina o reactor) para limitar y estabilizar la corriente.

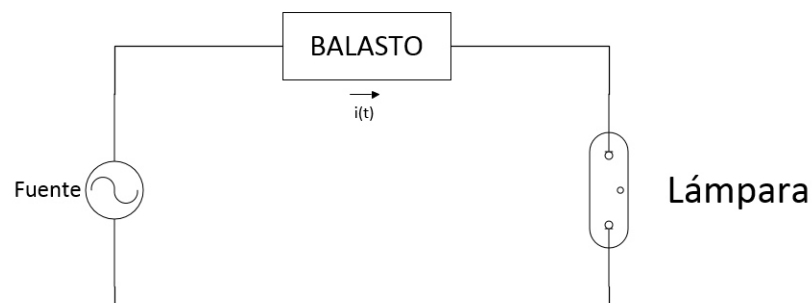


Figura 3: Balasto

El uso de balastos electrónicos ha mejorado notablemente la eficiencia de los sistemas de iluminación y sobre todo el aspecto de ahorro de energía [12]. Otras

ventajas que se lograron con el empleo de estos balastos son: el mayor rendimiento de la lámpara, menores pérdidas de potencia debido al balasto, la eliminación del efecto estroboscópico, control de la intensidad luminosa, e incluso la posibilidad de introducir control al sistema [12].

Entre las principales tareas [13] de balasto se encuentran las siguientes:

- Proveer la tensión adecuada para establecer un arco entre los dos electrodos que enciendan la lámpara.
- Regula la corriente que fluye a través de la lámpara para estabilizar la salida de luz.
- Proporciona la tensión de operación correcta para proveer la corriente de operación específica de la lámpara.

2.1.4 Fenómeno de Resonancias Acústicas

La operación en alta frecuencia (>1 kHz) de las lámparas de alta presión de descarga, traen consigo un fenómeno llamado resonancias acústicas.

Este fenómeno se debe a una distribución desigual de presiones en el interior del recipiente de descarga por la aparición de ondas de presión estacionarias para determinadas frecuencias de excitación, lo cual provoca movimientos del arco (flicker). Dependiendo de la frecuencia de excitación los movimientos del arco pueden ser más o menos violentos produciéndose una fuerte modulación de la luz generada en la descarga, lo cual puede llegar a provocar la extinción del arco [6].

Las frecuencias de excitación que dan lugar a fenómenos de resonancias, están influenciadas por la geometría del recipiente de descarga y por las variables termodinámicas de los gases de llenado [14]. En las lámparas de dimensiones reducidas, se producen fenómenos de resonancias a frecuencias muy elevadas. Además, la dispersión existente en los procesos de fabricación actuales hace que entre dos lámparas de iguales características la resonancia se produzca a frecuencias de excitación distintas. Por otra parte, las variables termodinámicas de los gases presentes en la descarga varían a lo largo de la vida de la lámpara produciendo un desplazamiento en las frecuencias de resonancia .

En este tipo de lámparas, los fenómenos asociados a las resonancias acústicas se producen en el rango de frecuencia más habitualmente empleado en los sistemas electrónicos de alimentación que varían de entre los 10 a 30 kHz [14].

Consecuencias

Entre las principales consecuencias [6] que producen resonancias acústicas se tiene:

- Fluctuación y parpadeo de la luz de salida.
- Crecimiento exagerado en la longitud del arco induciendo una sobre tensión en el balasto y una posible extinción del mismo.
- El arco puede tocar la pared del tubo de descarga, provocando la extinción del mismo e incluso la ruptura del tubo por un sobrecalentamiento local.

Parámetros que las afectan

Los principales parámetros [6] que las afectan son:

- Dimensiones físicas del electrodo y del tubo del arco de descarga.
- Temperatura de operación de la lámpara.
- Composición, densidad y presión del gas de llenado de la lámpara.
- Posición de funcionamiento o “quemado” de la lámpara.

Características

Las resonancias acústicas se caracterizan [6] principalmente por lo siguiente:

- 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.

Tipos de Resonancias Acústicas

Las resonancias acústicas se las puede clasificar [6] dependiendo del arco de descarga que se deforma, (véase a figura 4), por lo cual puede ser de los siguientes tipos:

- Acimutal.
- Transversal.
- Longitudinal.
- Combinaciones entre ellas.

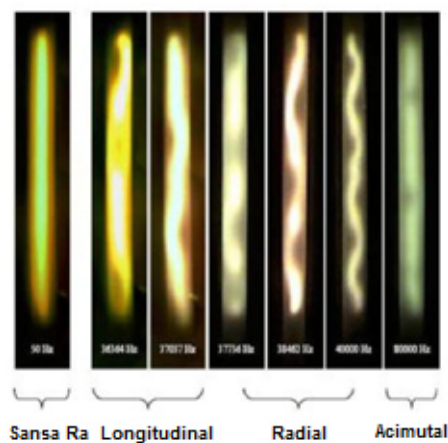


Figura 4: Tipos de Deformaciones del Arco de Descarga Causado por las Diferentes Resonancias Acústicas

Fuente: [15]

2.2 Modelado e Identificación de un Sistema Dinámico

El modelado e identificación de un sistema dinámico es actualmente la forma más utilizada para determinar el comportamiento de este tipo de sistemas. El balasto electrónico a desarrollar en conjunto con la lámpara HID forman un sistema dinámico que necesita ser modelado e identificado para posteriormente aplicar una técnica de control de tal manera que la lámpara tenga un mayor tiempo de vida útil y un funcionamiento estable.

2.2.1 Modelo de Sistemas

El modelado de un sistema permite crear un esquema con cierto grado de precisión, permitiendo un acercamiento a la realidad del funcionamiento del sistema. Un modelo según la Real Academia de la Lengua Española (RAE) es:

“Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”

es decir un modelo es un arquetipo de un sistema que muestra las reglas de conducta del mismo.

El modelamiento se puede realizar usando diversos modelos, así:

Modelo Mental

El modelo mental es aquel que genera el ser humano a través del mecanismo del pensamiento, basado en experiencias y conocimientos previos.

Modelo Verbal

Es un modelo cualitativo que describe a través de palabra la respuesta de un sistema ante un estímulo.

Modelo Físico

Este modelo usa representaciones a pequeña escala del sistema, de tal manera que se puede determinar parámetros físicos reales gracias a la utilización de materiales y fluidos con características similares a las del proceso real. La creación de un modelo a escala implica dificultades mecánicas y un costo monetario considerable.

Modelo Matemático

El modelo matemático consiste en la representación del comportamiento de un sistema no perteneciente al universo matemático en expresiones matemáticas.

Modelo de Caja Negra

Este es un modelo estadístico que se representa como una caja en la cual es de interés las entradas y salidas de la misma y su interacción con el medio; mas no es importante el contenido ni las interacciones dentro dicha caja, siendo aquí donde nace el nombre de caja negra.

Los modelos de caja negra se caracterizan por un alto poder de predicción y una escasa capacidad explicativa, ya que reproducen el sistema fielmente pero no se sabe como alcanza esta característica.

Modelo de Caja Blanca

El modelo de caja blanca es aquel donde se analiza tanto las entradas y salidas del sistema, como los elementos del sistema y sus interacciones. Se denomina de caja blanca ya que se puede observar cualquier proceso que este modelo realiza.

Estos son considerados como modelos físicos debido a que las transferencias de materia y energía entre sus componentes se rigen mediante ecuaciones físicas y que además cumplen las leyes de conservación de la materia y la energía.

Modelo de Caja Gris

Es el modelo intermedio de los dos anteriores, ya que el sistema se descompone en una serie de elementos que se resuelven como modelos empíricos pero cuya integración se basa en principios físicos o al menos en cierto conocimiento a priori de como funciona el sistema.

El modelado por caja gris es el más importante desde el punto de vista aplicativo ya que cumple dos aspectos fundamentales:

- El esfuerzo de modelado debe reflejar el uso que se le pretende dar al modelo
- No debe estimarse lo que ya se conoce.

2.2.2 Modelado de Sistemas

El modelado de un sistema dinámico utiliza un modelo, para el cual se obtienen las propiedades de dos maneras distintas. La primera es de forma empírica, es decir, el conocimiento que se tiene del sistema es a través de la experiencia; y la segunda forma, basada en literatura existente de distintos autores y científicos. Dicho esto se determina que la construcción de modelos se puede dar por dos métodos: modelado teórico y modelado experimental.

Modelado Teórico

El modelado teórico permite encontrar una representación interna o externa utilizando leyes, principios y teoremas de la ciencia: así por ejemplo las funciones de transferencia, que relacionan la entrada y la salida del sistema por medio de ecuaciones diferenciales que pueden ser llevadas a función de transferencia utilizando Laplace.

El modelado teórico permite dividir el sistema en subsistemas cuyos comportamientos son conocidos, de tal manera que se pueda determinar el comportamiento general de la planta.

Modelado Experimental

Este tipo de modelado se fundamenta en datos obtenidos a través de experiencias prácticas realizadas con el fin de encontrar una representación matemática del comportamiento de un proceso determinado. Este método también utiliza la observación como herramienta para el ajuste de los parámetros del sistema.

2.2.3 Identificación de Sistemas La identificación de sistemas tiene diferentes conceptos científicos, y la definición más usada es la de Sage (1971) que describe a la identificación como: *“el proceso de determinar un conjunto de ecuaciones diferenciales o en diferencias, o los parámetros de tales ecuaciones, que describen un proceso físico de acuerdo con un determinado criterio”*.

El proceso de identificación consiste en la recolección de datos de entrada y salida del sistema, los mismos que permiten identificar su comportamiento. Para una correcta identificación se deben seguir los siguientes pasos:

Adquisición de datos de entrada y salida

La adquisición de datos debe contar con una correcta excitación del sistema a través de una señal de entrada que puede ser un escalón, una sinusoidal, entre otras. La característica principal de la señal de entrada es su capacidad de excitación a todas las dinámicas del sistema.

Existen sistemas dinámicos que requieren una señal de excitación aproximada al ruido blanco, la característica principal de estas señales es que las funciones de autocorrelación y correlación cruzada deben ser próximas a una señal Delta de Dirac. Las señales de ruido analógico requieren un equipo especializado para su generación, razón por la cual se utilizó otro tipo de señal que cumpla con las características antes mencionada, siendo esta la Secuencia Binaria Pseudoaleatoria (SBPA)[1].

La SBPA es una señal que permite la identificación de un sistema y para su utilización se debe considerar: la aplicación en un sistema lineal, estimación de la constante de tiempo (τ) y del tiempo de establecimiento aproximados del sistema para tomar en cuenta en el diseño la excitación de las dinámicas rápidas y lentas del sistema, y finalmente se debe tener en cuenta que la señal de excitación puede tener un cambio máximo de $\pm 10\%$ de la señal a partir del punto de operación

con el fin de permanecer dentro de la región de operación deseada.

Los parámetros de diseño de la SBPA con el fin que excite todas las dinámicas del sistema son los siguientes [16]:

- Ancho del pulso más corto (T_c), es el encargado de excitar las dinámicas rápidas del sistema y debe ser al menos $T_c = \frac{\tau}{2}$.
- Máxima longitud (N), depende directamente de los coeficientes que se muestran en el cuadro 1 bajo la fórmula $N = 2^m - 1$.
- Duración del ensayo (Tt), es el ancho de pulso más largo que debe responder a un mínimo de tres veces la constante de tiempo del sistema $T_t \approx 3\tau$. Para tener un valor estimado de τ se recomienda aplicar un escalón al sistema.
- La amplitud del pulso (ΔP), este dependerá netamente del sistema a ser trabajado.

Cuadro 1: Coeficientes para generación de la señal SBPA [1]

m	Coeficientes igual a 1
2	a1,a2
3	a1,a3
4	a3,a4
5	a3,a5
6	a2,a3,a6
7	a4,a7
8	a2,a3,a4,a8
9	a5,a9
10	a7,a10
11	a9,a11

Una vez escogida la señal de entrada se procede a excitar el sistema para registrar los datos obtenidos durante un intervalo de tiempo determinado.

Formulación de un criterio

La formulación de un criterio que demuestre la bondad del modelo es primordial para efectuar la estimación y validación del mismo. Por lo general los criterios

de bondad tienen la forma:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N g(e(k)) \quad (1)$$

Donde θ es el vector de parámetros que se desea adecuar, $e(k)$ es el error de estimación para la medida k , N es el número de datos recolectados y $g(\cdot)$ es una función generalmente cuadrática.

El objetivo es hacer mínimo el valor de $J(\theta)$ y se puede lograr a través de los siguientes algoritmos:

- Mínimos Cuadrados
- Predicción del Error
- Variable Instrumental
- Raíz Cuadrada
- Máxima Verosimilitud

Seleccionar la estructura del modelo

La selección de la estructura del modelo depende de si es un modelo de caja blanca, negra o gris; también depende de si un sistema es o no paramétrico.

Los modelos paramétricos son aquellos que poseen una serie de parámetros que requieren ser ajustados; mientras que los modelos no paramétricos son aquellos que obtienen las ecuaciones a través de la respuesta al escalón o la respuesta en frecuencia.

La realización de una correcta selección de la estructura está ligada al amplio conocimiento del sistema y del conjunto de datos registrados.

Estimación de los parámetros del modelo

La estimación de los parámetros del modelo evalúa la respuesta que mejor se ajusta al sistema, considerando los datos obtenidos de manera experimental y el criterio de bondad del modelo.

Estimar los parámetros de un modelo consiste en minimizar el criterio de bondad del modelo escogido utilizando el conjunto de datos de entrada y salida adquiridos. La realización de la estimación se puede desarrollar a través de una identificación en línea o de una identificación fuera de línea.

- La identificación en línea es la estimación del modelo a través de la obtención de datos en tiempo real y su procesamiento es de forma recursiva.
- La identificación fuera de línea es aquella que emplea los datos obtenidos experimentalmente para ser posteriormente procesados y ajustados a un modelo. Este método es más preciso y converge de mejor manera hacia lo real.

Validación del modelo obtenido

La validación del modelo obtenido consiste en comprobar que este satisface el sistema dinámico a través del criterio de bondad. Una de las técnicas más utilizadas para la validación del modelo es la validación cruzada.

La validación cruzada consiste en la separación del conjunto de datos en: datos de estimación y datos de validación, siendo capaz de reproducir los datos de salida para entradas que no se han empleado en la estimación.

Otra forma de validación que actualmente se utiliza, es la simulación del modelo, y consiste en la predicción de la salida del sistema ante entradas experimentales. El grado de satisfacción del modelo a través de inspección visual.

Existen otros métodos de validación del modelo como el análisis de residuos y el criterio de Akaike. El uso de estos criterios dependerá del sistema que se va a analizar.

2.3 Control Adaptativo - Predictivo

El control adaptativo - predictivo es un control de tipo intuitivo, en el cual, se alcanza la salida deseada a través de las predicciones realizadas en base al modelo de la planta.

La técnica de control adaptativo - predictivo se puede utilizar en sistemas SISO o MIMO, cuyo proceso varia en el tiempo, al igual que en sistemas con restricciones y/o retardo. El objetivo de este tipo de control es encontrar la ley de control, la misma que permite calcular la salida predicha. Los parámetros del modelo adaptativo - predictivo son descargados en tiempo real, basado en la manera con la que va a actuar el vector de salida predicho por el modelo, para enfocarse en el vector de salida actual del proceso [17].

El control predictivo basado en modelo (MPC ó MBPC por sus siglas en inglés) tiene varios métodos de control de acuerdo al modelo de un proceso específico, para así obtener la ley de control minimizando la función objetivo.

Básicamente el control predictivo se puede resumir en las siguientes ideas [18]:

- El uso explícito de un modelo predictivo del proceso para las salidas futuras en un instante de tiempo (Horizonte).
- El cálculo de una secuencia de control minimizando una función objetivo.
- Una estrategia de retroceso, de modo que para cada instante del horizonte que es desplazado hacia el futuro, lo que involucra la aplicación de la primera señal de control de la secuencia calculada en cada paso.

El MPC presenta una serie de ventajas sobre otros métodos de control como los siguientes [18]:

- Es particularmente atractivo para las personas con un conocimiento limitado de control porque los conceptos son muy intuitivos y al mismo tiempo la sintonización es relativamente fácil.
- Puede ser usado para controlar una gran variedad de procesos, desde aquellos con una dinámica relativamente simple hasta otros mas complejos, incluyendo sistemas con tiempos de retardo largos o sistemas inestables.
- Fácilmente casos con multivariable pueden ser parte de estos procesos.

- Intrínsecamente tiene compensaciones para los tiempos muertos.
- Introduce realimentación al control, para así compensar las perturbaciones medibles de una manera natural.
- La regla de control lineal es fácil para implementar en el controlador resultante.
- Es totalmente una metodología abierta basada en ciertos principios básicos que permiten extensiones futuras.

2.3.1 Estrategia del MPC

La estrategia para todos los controladores que pertenecen a la familia del MPC está caracterizada por la siguiente estrategia, representada en la figura 5:

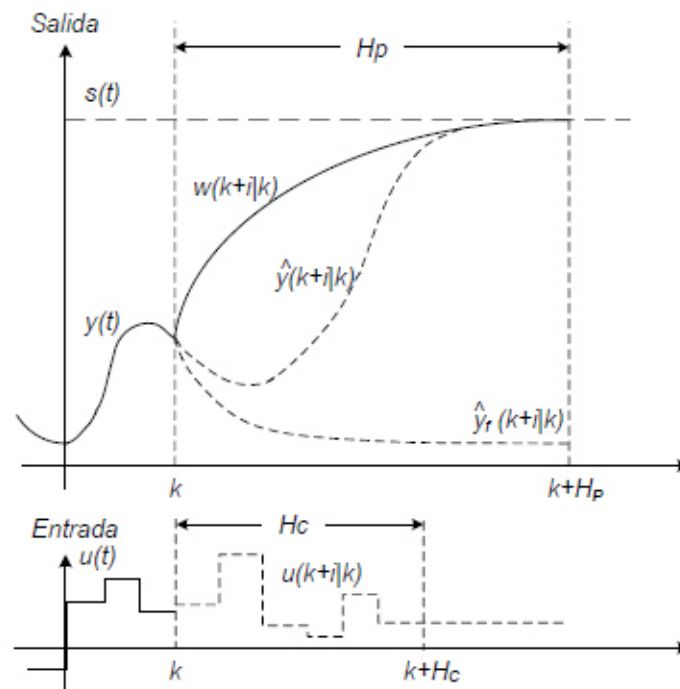


Figura 5: Estrategia del MPC
Fuente: [19]

1. Las salidas futuras para un determinado horizonte N , llamado horizonte de predicción, son predichas para cada instante t usando el modelo del proceso. Estas salidas predichas $y(t+k | t)$ para $k = 1 \dots N$ dependen de los valores conocidos en el instante t (salidas y entradas pasadas) y en las señales de control futuras $u(t+k | t), k = 0 \dots N-1$, las cuales son enviadas al sistema y para ser calculadas.
2. El conjunto de las señales de control futuras es calculado para optimizarlo y así mantener lo mas cercano posible a la trayectoria de referencia $w(t+k)$ (el cual puede ser el setpoint o una aproximación de este). Este criterio usualmente toma la forma de una función cuadrática de error entre la señal de salida predicha y la trayectoria de referencia predicha. Una solución puede ser obtenida si el criterio es cuadrático, el modelo es lineal y no hay restricciones, de otra manera una optimización iterativa del método que se plantea usar. En algunos casos es posible hacer que sea tratada como una constante desde un instante dado.
3. La señal de control $u(t | t)$ es enviada al proceso, mientras que la siguiente señal de control calculada es descartada, porque el siguiente instante de muestreo $y(t+1)$ es ya conocido y el paso 1 es repetido con este nuevo valor y todas las secuencias son actualizadas. Así el $u(t+1 | t+1)$ es calculado (el cual al principio va a ser diferente a $u(t+1 | t)$ por la nueva información disponible) usando el concepto de horizonte de retroceso [18].

En la figura 6 se muestra la estructura básica de este modelo, que es usado para predecir las salidas futuras de la planta en base al pasado, los valores actuales y las acciones de control futuras. Estas acciones son calculadas por el optimizador tomando en cuenta la función de costo y las restricciones.

El modelo del proceso juega un papel decisivo en el controlador, ya que el modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso, predecir las

salidas futuras de manera precisa, y también debe ser simple para su implementación y entendimiento [18].

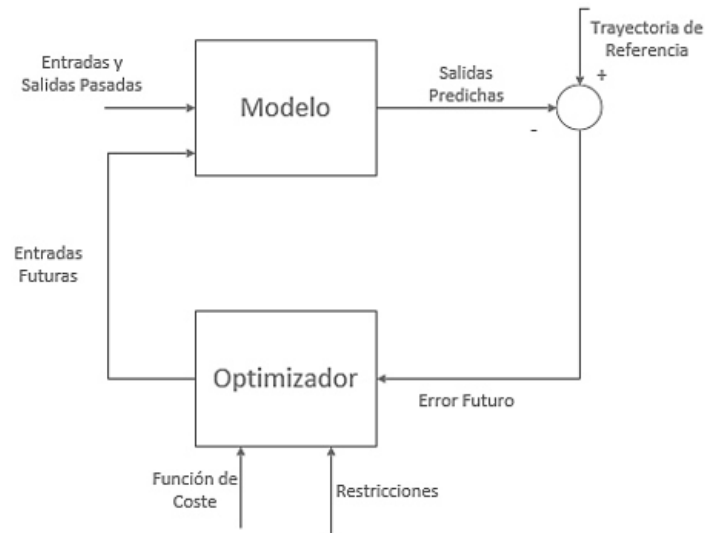


Figura 6: Estructura del MPC

2.3.2 Elementos Básicos del MPC

El MPC, a pesar de sus diferentes algoritmos de control mantiene los siguientes elementos en común:

- Modelo de predicción
- Función Objetivo
- Obtención de la ley de control

Modelo de Predicción

El modelo de predicción es de gran importancia en el desarrollo del MPC, su diseño debe capturar al máximo la dinámica del proceso y a su vez permitir el cálculo de las salidas predichas.

Este modelo está compuesto por el modelo de proceso y el modelo de perturbaciones; el primero describe el comportamiento de la planta como tal, y el segundo describe los agentes externos, como por ejemplo el ruido y los errores de modelado.

Modelo del Proceso Las formas más usadas de modelar un proceso para la formulación del MPC son las siguientes [18]:

- *Respuesta al impulso.* También conocida por secuencia de ponderación o modelo de convolución. La salida viene relacionada con la entrada por:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i u(t - i) \quad (2)$$

donde h_i es la salida muestreada cuando el proceso es excitado por un impulso unitario.

- *Respuesta al escalón.* Es muy similar al anterior sólo que la señal de entrada es un escalón. Para sistemas estables se tiene la respuesta truncada que será (ver figura 7):

$$\begin{aligned} y(k) &= y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t - i) \\ &= y_0 + G(z^{-1})(1 - z^{-1})u(t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde las g_j son los valores muestreados ante la entrada escalón y $\Delta u(t) = u(t) - u(t - 1)$.

- *Funciones de transferencia.* Se utiliza el concepto de función de transferencia $G = B/A$ con lo que la salida viene dada por:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) \quad (4)$$

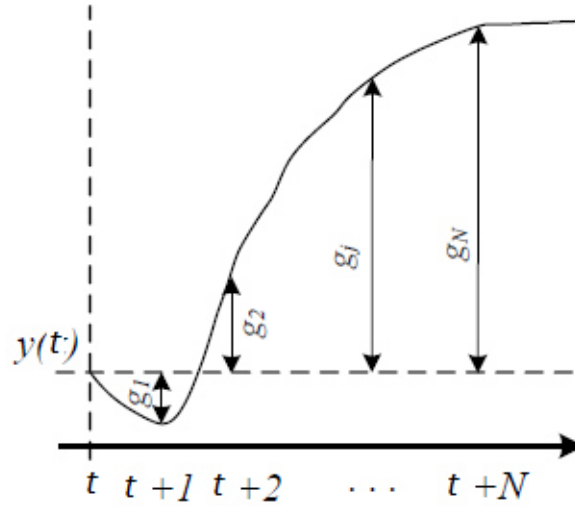


Figura 7: Respuesta al Escalón del Sistema
Fuente: [19]

donde:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \end{aligned} \quad (5)$$

Por lo tanto la predicción viene dada por:

$$\hat{y}(t+k | t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t+k | t) \quad (6)$$

Esta representación también es válida para procesos inestables y posee la ventaja de necesitar pocos parámetros, aunque es fundamental un conocimiento a priori del proceso, sobre todo en cuanto al orden de los polinomios A y B .

- *Espacio de estados.* Tiene la siguiente representación:

$$\begin{aligned} x(t) &= Mx(t-1) + Nu(t-1) \\ y(t) &= Qx(t) \end{aligned} \quad (7)$$

siendo x el estado y M , N y Q las matrices del sistema, de entrada y salida respectivamente. Para este modelo la predicción viene dada por:

$$\hat{y}(t+k|t) = Q\hat{x}(t+k|t) = Q \left[M^k x(t) + \sum_{i=1}^k M^{i-1} N u(t+k-i|t) \right] \quad (8)$$

Posee la ventaja de que sirve también para sistemas MIMO, a la vez que permite analizar la estructura interna del proceso.

- *Otros.* Los modelos no lineales también pueden ser utilizados para representar al proceso pero no para el problema de optimización. Las redes neuronales así como la lógica difusa son otras formas de representación usadas en algunas aplicaciones [18].

Modelo de perturbaciones Es de gran importancia elegir un determinado modelo del proceso como también la elección del modelo utilizado para representar las perturbaciones. Un modelo bastante extendido es el Control Autoregresivo Integrado de Media Móvil (CARIMA, por sus siglas en inglés) mostrado en la figura 8, en el que las perturbaciones, es decir, las diferencias entre la salida medida y calculada por el modelo vienen dadas por:

$$n(k) = \frac{C(z^{-1})e(t)}{D(z^{-1})} \quad (9)$$

donde el polinomio $D(z^{-1})$ incluye explícitamente el integrador $\Delta = 1 - z^{-1}$, $e(t)$, el cual es un ruido de media cero y normalmente el polinomio C se considera igual a uno. Este modelo es apropiado para dos tipos de perturbaciones: cambios aleatorios ocurridos en instantes aleatorios y movimiento browniano. Y es usado en varios métodos, al incluir un integrador se consigue un control sin errores en el estado estable.

Respuestas libre y forzada Una característica típica de los controladores predictivos es el empleo de los conceptos de respuesta *libre* y *forzada*. La idea es expresar la secuencia de acciones de control como la suma de dos señales:

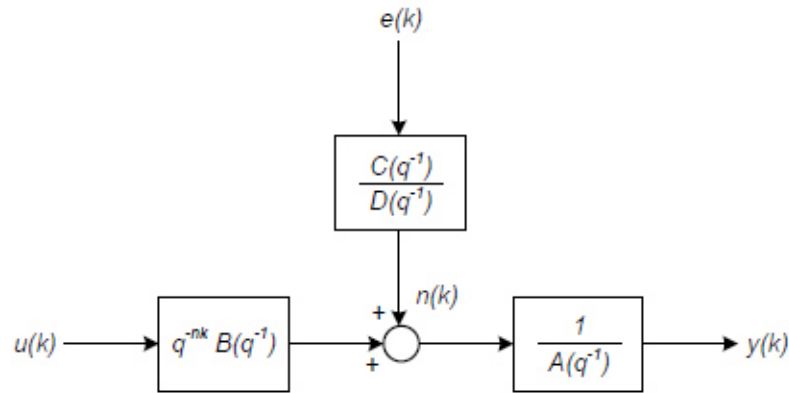


Figura 8: Estructura CARIMA
Fuente: [19]

$$u(t) = u(t)_f + u_c(t) \quad (10)$$

La señal $u(t)_f$ corresponde a las entradas pasadas (anteriores al instante t) y en el futuro se mantiene constante e igual al último valor de la variable manipulada. Es decir:

$$\begin{aligned} u_f(t-j) &= u(t-j) \quad \text{para } j = 1, 2, \dots \\ u_f(t+j) &= u(t-1) \quad \text{para } j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

La señal u_c vale cero en el pasado y corresponde a las señales de control en los tiempos futuros:

$$\begin{aligned} u_f(t-j) &= 0 \quad \text{para } j = 1, 2, \dots \\ u_c(t+j) &= u(t+j) - u(t-1) \quad \text{para } j = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

La predicción de la secuencia de salida se separa en dos partes, como se ve en la figura 9. Una de ellas $y_f(t)$, la respuesta *libre*, corresponde a la predicción de la salida cuando se toma como entrada únicamente $u_f(t)$, y la otra, la respuesta *forzada* $y_c(t)$, corresponde a la salida cuando la señal de control es $u_c(t)$. La respuesta *libre* corresponde a su estado actual, mientras el proceso evoluciona (influido principalmente por las acciones de control pasadas) mientras que la respuesta *forzada* se debe a las acciones de control futuras [19].

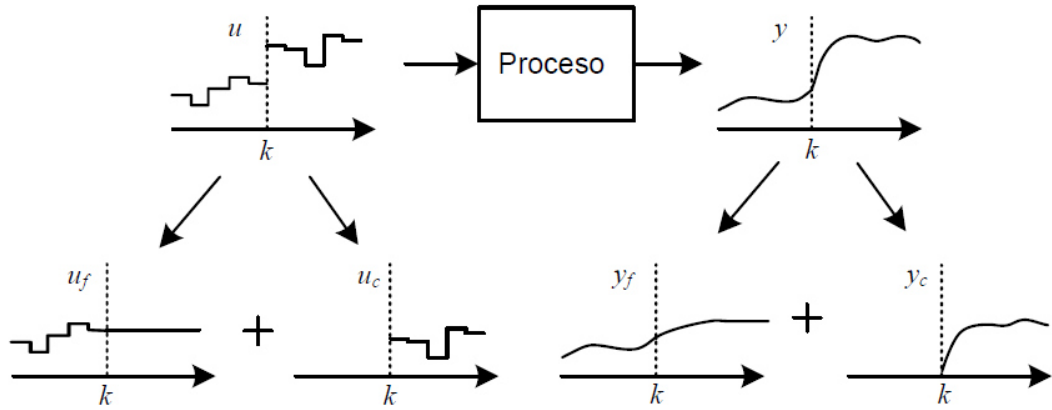


Figura 9: Respuesta Libre y Respuesta Forzada.
Fuente: [19]

Función Objetivo

Para la obtención de la ley de control se tienen diversos algoritmos de MPC. Lo que se busca en términos generales es que la salida futura (\hat{y}) en el horizonte considerado siga una determinada señal de referencia (w), al mismo tiempo que se puede penalizar el esfuerzo del control (Δu) requerido para hacerlo. La expresión general de la función objetivo es:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (13)$$

Dependiendo del método, el segundo sumando es considerado como el esfuerzo de control, por lo cual no se toma en cuenta, mientras que en otros aparecen directamente los valores de la señal de control (no sus incrementos). En la función de costo se pueden considerar:

- *Parámetros.* N_1 y N_2 son los horizontes mínimo y máximo de costo (o de predicción) y N_u es el horizonte de control. N_1 y N_2 son intuitivos ya que limitan los instantes en que se desea que la salida siga la referencia. Se debe tomar en cuenta que para procesos con tiempo muerto d no tiene

sentido que N_1 sea menor que dicho valor puesto que la salida no empezará a evolucionar hasta el instante $t + d$. Además, si el proceso es de fase no mínima, este parámetro permite eliminar de la función objetivo los primeros instantes de respuesta inversa. Los coeficientes $\delta(j)$ y $\lambda(j)$ son secuencias que ponderan el comportamiento futuro, cuyos valores generalmente son constantes o secuencias exponenciales.

- *Trayectoria de referencia.* Se puede definir de antemano la trayectoria de referencia si se conoce la evolución futura de la referencia. En el criterio de minimización (13), la mayoría de los métodos suelen utilizar una referencia $w(k + i | k)$ que no tiene por qué coincidir con la referencia real. Normalmente será una suave aproximación desde el valor actual de la salida $y(t)$ a la referencia mediante un sistema de primer orden [18]:

$$w(t) = y(t) \quad w(t + k) = \alpha w(t + k - 1) + (1 - \alpha)r(t + k) \quad k = 1 \dots N \quad (14)$$

α es un parámetro comprendido entre 0 y 1 (mientras más próximo a 1 más suave será la aproximación) que constituye un valor ajustable que influirá en la respuesta dinámica del sistema.

- *Restricciones.* Una de las grandes bondades que proporciona el control predictivo es la posibilidad de tomar en cuenta las restricciones propias del proceso. El principal motivo para considerar restricciones en las variables propias del proceso consiste en que violarlas puede ser muy costoso o peligroso, porque puede originar daños en los equipos y pérdidas en la producción [19].

Obtención de la ley de control

Para obtener los valores de $u(t + k | t)$ será necesario minimizar la función de costo, dada por (13). Por lo cual, se calculan los valores de la salida predicha

$\hat{y}(t+k | t)$ en función de los valores pasados de entrada y salida de señales de control futuras, haciendo uso del modelo del proceso elegido para luego ser sustituidos en la función de costo, obteniendo una expresión que después de ser minimizada se encuentran los valores buscados. Para el criterio cuadrático, si el modelo es lineal y no existen restricciones, se puede obtener la solución de forma analítica; si no es así se debe usar un método iterativo de optimización [19].

De cualquier manera, la obtención de la solución no resulta tan trivial pues existirán $N_2 - N_1 + 1$ variables independientes, valor que puede ser elevado (del orden 10 a 30) [18]. Estructurar la ley de control produce una mejora en la robustez y en el comportamiento general del sistema. Lo anterior se debe fundamentalmente al hecho de permitir la libre evolución de las variables manipuladas (sin estructurar) puede conducir a señales de control de alta frecuencia no deseables y que en el peor de los casos, podrían conducir a la inestabilidad. Esta estructura de la ley de control se plasma en el uso del concepto de horizonte de control N_u , que consiste en considerar que tras un cierto tiempo N_u ($0 < N_u < N_2$) no hay variación en las señales de control propuestas, es decir [18]:

$$\Delta u(t+j-1) = 0 \quad j > N_u \quad (15)$$

lo cual es equivalente a dar pesos infinitos a los cambios en el control a partir de N_u . El caso extremo sería igual a $u(t)$.

Otra forma de estructurar la señal de control es con el uso de *funciones base*: un procedimiento utilizado en el control predictivo funcional, que consiste en representar la señal de control como una combinación lineal de ciertas funciones predeterminadas.

2.3.3 Revisión de los principales algoritmos

A continuación se presentan algunos de los principales algoritmos de control predictivo [18], mostrando de manera general sus principales características.

Control por matriz dinámica (DMC)

Para modelar el proceso, este método usa la respuesta ante un escalón, considerando sólo los primeros N_2 términos; asumiendo que el proceso es estable; y se

considera que el valor de las perturbaciones es constante e igual al existente en el instante actual durante todo el horizonte, es decir igual al valor medido de la salida y_m , menos el estimado por el modelo $\hat{y}(t + j | t)$.

Control algorítmico de modelo (MAC)

Este método es muy similar al DMC con la diferencia de usar un modelo de respuesta al impulso y no utilizar el concepto de horizonte de control, por lo que calcula todos los movimientos de control correspondientes al horizonte de predicción. Sin embargo hace uso del concepto de trayectoria de referencia como un sistema de primer orden que evoluciona desde la salida actual a la salida deseada según una determinada constante de tiempo, utilizando la expresión (14). La varianza del error entre esta trayectoria y la salida es lo que marca la minimización de la función objetivo.

Control predictivo funcional (PFC)

Este controlador se caracteriza por que es usado en procesos rápidos. Emplea un modelo en espacio de estados, por lo que permite el manejo de procesos inestables, y también la extensión al caso no lineal. Este esquema de control usa puntos de coincidencia y de funciones bases, que son características que lo distinguen del resto de controladores.

Control autosintonizado de predicción extendida (EPSAC)

Este controlador usa un modelo de función de transferencia y puede ampliarse para tratar perturbaciones medibles, al añadir un término que influye en la prealimentación. La estructura de la ley de control es muy simple, ya que se considera que la señal de control permanecerá constante a partir del instante en el que el horizonte de control sea igual a 1.

Control predictivo no lineal (NLMPC)

En general, los procesos industriales son no lineales, pero aún así, la mayoría de aplicaciones del MPC están basadas en el uso de modelos lineales. Existen dos importantes razones para ello: por un lado, la identificación de un modelo lineal a partir de datos de proceso es relativamente sencilla y por otro, los modelos lineales proporcionan buenos resultados cuando la planta opera en las cercanías del punto de operación. Un modelo no lineal requiere la consideración (y al menos la resolución parcial) de un problema no lineal no convexo (programación no lineal, NLP) que da lugar a una serie de dificultades computacionales relacionadas con el costo y la habilidad de la resolución del problema de optimización en línea.

Normalmente el problema se resuelve haciendo uso de la programación cuadrática secuencial (SQP), que son extensiones de métodos de tipo Newton. El método debe garantizar convergencia rápida y debe tratar problemas de mal acondicionamiento y no linealidades extremas. La solución exacta del problema de optimización en cada instante de muestreo es una tarea ardua. Por ello, en los últimos años ha aparecido una serie de formulaciones que pretenden evitar los problemas asociados a la optimización no convexa. Estas formulaciones deben abordar la estabilidad y la factibilidad de la solución que debe calcularse durante el periodo de muestreo [19].

Control predictivo generalizado (GPC)

El control predictivo generalizado es capaz de resolver muchos problemas de control diferentes para un amplio campo de procesos con un número razonable de variables de diseño, especificadas por el operador, dependiendo de los conocimientos previos del proceso y de los objetivos de control.

El GPC está basado en el modelo CARIMA para la predicción de la salida:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})z^{-d}u(t-1) + C(z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta}, \quad \Delta = 1 - z^{-1} \quad (16)$$

donde $u(t)$ y $y(t)$ son respectivamente la señal de control y salida del proceso, $e(t)$ es un ruido blanco de media cero y d es el tiempo muerto. A , B y C son los siguientes polinomios en el operador de desplazamiento hacia atrás z^{-1} :

$$\begin{aligned}
A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na} z^{-na} \\
B(z^{-1}) &= b_0 z^{-1} + b_1 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \\
C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc}
\end{aligned} \tag{17}$$

En la práctica es difícil encontrar el verdadero valor del polinomio $C(z^{-1})$, que se puede emplear como parámetro de diseño para rechazo de perturbaciones o mejora de la robustez.

Al resolver una ecuación diofántica se llega a una predicción óptima, lo cual puede hacerse eficazmente de forma recursiva. Este control usa el modelo de función de transferencia, el cual se puede implementar fácilmente en forma adaptable usando un algoritmo de identificación en línea como los mínimos cuadrados recursivos. El control predictivo generalizado usa una función de costo cuadrática de la forma [19]:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j | t) - w(t+j)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(t) [\Delta u(t+j-1)]^2 \tag{18}$$

El objetivo del control predictivo es estimar la secuencia futura de control $u(t)$, $u(t+1)$, ... en donde la salida de la planta $y(t+j)$ siga lo más cercano posible a la trayectoria de referencia $w(t+j)$.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL CONTROL ADAPTATIVO - PREDICTIVO

El presente capítulo describe el diseño de un controlador adaptativo – predictivo, el mismo que está formado por dos partes: una identificación adaptativa con el método de Mínimos Cuadrados ARX y una técnica de control conocida como Control Predictivo Generalizado. Las partes antes mencionadas permiten la elaboración de un controlador que se adapta a los cambios del sistema balasto – lámpara.

3.1 Modelo e Identificación del sistema Balasto- Lámpara

La identificación del sistema se puede realizar por varios métodos como se indica en el capítulo 2, sin embargo en el presente documento se realiza una identificación en línea utilizando el método de mínimos cuadrados ARX (autoregressive exogenous).

El primer paso para tener una buena identificación del sistema es el diseño de la señal de excitación, que en este caso será una señal binaria pseudoaleatoria (SBPA). Para la creación de una SBPA adecuada se parte de la constante de tiempo del sistema obtenida luego del análisis de las gráficas del comportamiento del banco de pruebas, las mismas que se adquirió con la registradora de plantas y con la tarjeta de adquisición de datos gage (véase el anexo B); siendo la constante de tiempo del sistema (τ) igual a 2 ms se reemplaza este valor en las ecuaciones de diseño [16] y se tiene:

$$\begin{aligned}
 T_c &= \frac{\tau}{2} \\
 T_c &= \frac{2ms}{2} \\
 T_c &= 1ms
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 T_t &\approx 3\tau \\
 T_t &\approx 3(2ms) \\
 T_t &\approx 6ms
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Donde:

- T_c es el tiempo del pulso más corto
- T_t es el ancho de pulso más largo

Basado en(19), el tiempo de muestreo será 1ms y según (20) 6ms sería el tiempo de la dinámica más larga, sin embargo como el sistema balasto - lámpara es de respuesta lenta, el tiempo de establecimiento del sistema es considerado 10 veces τ , es decir, 20ms. Con está información se escoge una semilla de 8 bits como se indica en (22) y en (24) se demuestra que cubre el tiempo de la dinámica más alta de la lámpara, es decir, cumple con el tiempo de establecimiento.

$$t_m = 1ms \tag{21}$$

$$m = 8 \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 N &= 2^m - 1 \\
 N &= 2^8 - 1 \\
 N &= 255
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
T_{maxSBPA} &= t_m * N \\
T_{maxSBPA} &= 1ms * 255 \\
T_{maxSBPA} &= 255ms
\end{aligned}
\tag{24}$$

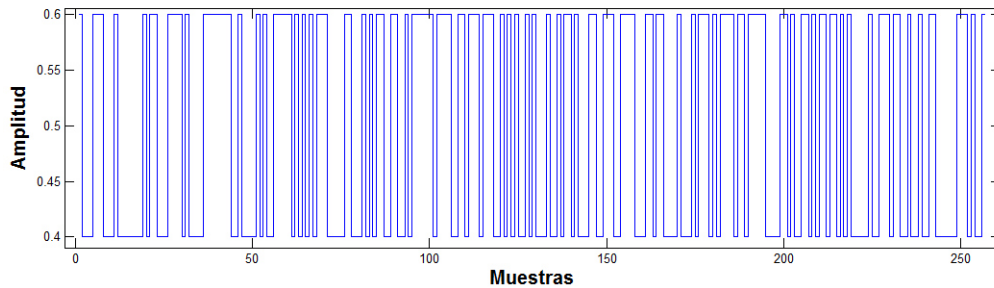


Figura 10: Señal Binaria Pseudo Aleatoria (SBPA)

La figura 10 muestra la señal SBPA diseñada de acuerdo a las exigencias del sistema a identificar; como la señal de excitación del sistema es de tipo binaria se debe definir que representan los ceros y los unos, que se muestra en la tabla 2.

Cuadro 2: Representación de la Señal Binaria en Ciclo de Trabajo

Binario	Ciclo de Trabajo
0	0.4
1	0.6

La aplicación de la señal de excitación al sistema se basa en el método propuesto por Ayala[20]; este método indica que al mantener la señal de excitación en un determinado ciclo de trabajo genera un mismo valor medio durante el tiempo que permanezca dicho ciclo de trabajo, el valor medio cambiará cuando el ciclo de trabajo varíe, es decir, para cada valor de ciclo de trabajo existe un valor medio. La presente investigación utiliza una SBPA de 31 kHz de la cual se toma el valor medio como se muestra en la figura 11, el mismo que cambia al variar el ciclo de trabajo de la SBPA de 40% al 60% y viceversa.

Una vez diseñada la señal de excitación y establecido el método de captura de datos se procede a la aplicación del algoritmo MMCARX (Método de Mínimos Cuadrados Recursivos con Variable Exógena). El desarrollo matemático de dicho algoritmo se encuentra en [1], siendo las ecuaciones resultantes del algoritmo de identificación MMCARX las siguientes:

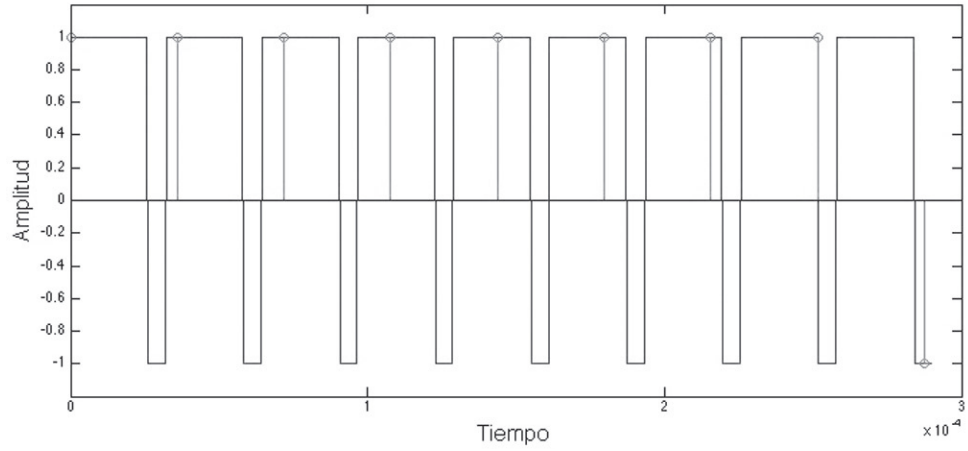


Figura 11: Obtención de Muestras para el Cálculo del Valor Medio
Fuente: [20]

$$g(t+1) = C(t)z(t+1) \quad (25)$$

$$\alpha^2(t+1) = \varphi^2 + z^T(t+1)g(t+1) \quad (26)$$

$$\hat{e}(t+1) = y(t+1) - \hat{P}^T(t)z(t+1) \quad (27)$$

$$\hat{P}(t+1) = \hat{P}(t) + \frac{1}{\alpha^2(t+1)}g(t+1)\hat{e}(t+1) \quad (28)$$

$$v(t+1) = 1 + \varphi^2v(t) \quad (29)$$

$$\hat{\sigma}^2(t+1) = \frac{\varphi}{v(t+1)} \left[v(t)\hat{\sigma}^2(t) + \frac{1}{\alpha^2(t+1)}\hat{e}(t+1)\hat{e}^T(t+1) \right] \quad (30)$$

$$C(t+1) = \frac{1}{\varphi^2} \left[C(t) - \frac{1}{\alpha^2(t+1)}g(t+1)g^T(t+1) \right] \quad (31)$$

Donde:

- g : matriz de estimación
- C : matriz de la covarianza de la estimación
- z : vector de regresión
- α^2 : escalar
- φ : factor de olvido
- e : vector de ruido
- y : salida del sistema
- P : vector de coeficientes
- v : ruido correlacionado
- σ^2 : varianza del ruido

Ya establecida la señal de excitación del sistema y el algoritmo de identificación se procede a la obtención de datos a través del microcontrolador.

El conjunto de datos obtenido es procesado con la herramienta de identificación de MATLAB® conocida como “ident”, en esta se escoge: los datos de identificación, los datos de validación, el método de identificación y el orden del sistema.

Si se toman 255 datos para identificación, 255 datos para validación, método ARX y orden uno se tiene una identificación al 91,43 % como muestra en la figura 12; siendo el modelo escogido eficiente, ya que posee una eficiencia mayor al 80 %. La herramienta ident muestra también los polos y ceros, el análisis de residuos y la respuesta en frecuencia (Anexo B).

Una vez verificada que la eficiencia de los datos obtenidos, a través de la herramienta ident de MATLAB®, es mayor al 80 % se procede a desarrollar el código en MATLAB® descrito en el Anexo C1. Los datos de entrada (ciclo de trabajo) y de salida (tensión en la lámpara) se ingresan en MATLAB® y se procede a

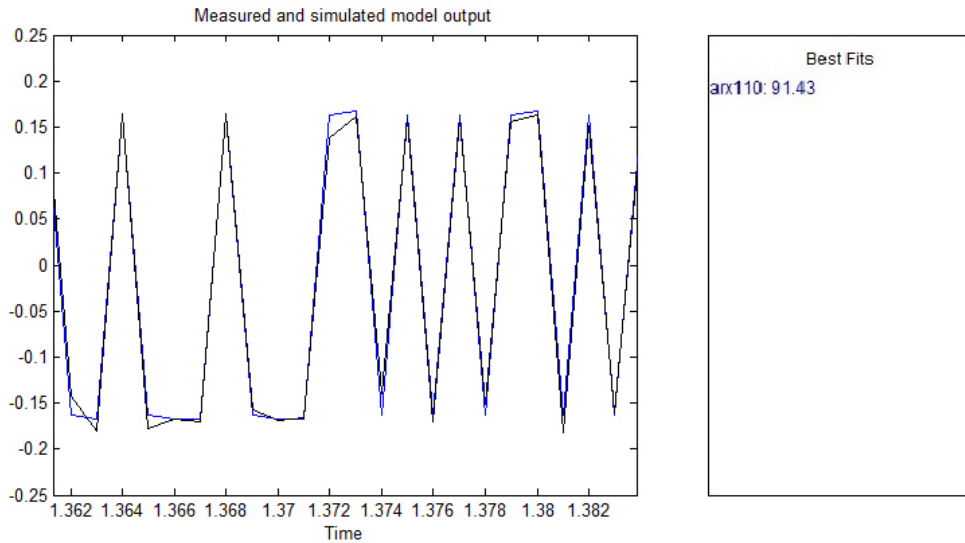


Figura 12: Porcentaje de Identificación del Sistema (Ident - MATLAB)

compilar el código del algoritmo de identificación MMCARX, obteniendo la función de transferencia del sistema balasto - lámpara que se representa en (32) y la respuesta al escalón de dicha planta representada en la figura 13.

$$\frac{y(z)}{u(z)} = \frac{0,9378}{z - 0,5799} \quad (32)$$

Donde $y(z)$ es la salida de tensión de la lámpara y $u(z)$ es la entrada del sistema, que en este caso es ciclo de trabajo de la señal PWM.

3.2 Diseño del Controlador

El controlador adaptativo - predictivo a ser diseñado se basa en el algoritmo de Control Predictivo Generalizado (GPC) que se indica en el libro de Camacho [18]. El desarrollo matemático del controlador predictivo requiere del conocimiento previo de la función de transferencia en tiempo discreto, la misma que fue calculada en la sección anterior y se muestra en (32).

El modelo base del GPC es el modelo CARIMA como se indica en (16), y está formado de 3 polinomios que se muestran en (17). El diseño del controlador considera al polinomio de ruido C igual a 1, ya que se considera la influencia

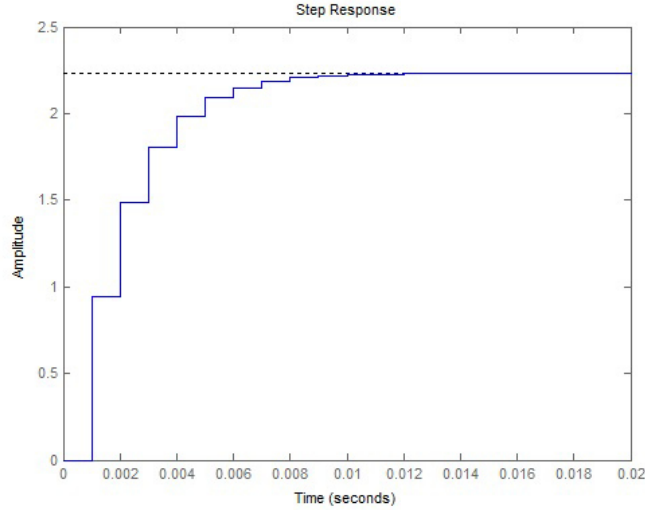


Figura 13: Respuesta al Escalón del Sistema Balasto - Lámpara Identificado

de ruido blanco; mientras que los polinomios A y B pertenecen a la función de transferencia hallada en (32), y sus coeficientes son:

$$a = -0,5799 \quad b_0 = 0,9378$$

El algoritmo GPC consiste en aplicar una secuencia de control para minimizar la función de costo expresada en la siguiente ecuación:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j | t) - w(t+j)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(t) [\Delta u(t+j-1)]^2$$

Donde $\hat{y}(t+j | t)$ es la salida predicha del sistema hasta el tiempo t , N_1 y N_2 son el horizonte de costo mínimo y máximo respectivamente, N_u es el horizonte de control, $\delta(j)$ y $\lambda(j)$ son secuencias de ponderación y $w(t+j)$ es la trayectoria de referencia. Los valores de diseño tomados para los horizontes de costo y de control se muestran a continuación:

$$d = 0 \quad N_1 = d + 1 = 1 \quad N = N_u = 3$$

Considerando la siguiente ecuación diofántica:

$$1 = E_j(z^{-1}) \cdot \tilde{A}(z^{-1}) + z^{-j} \cdot F_j(z^{-1}) \text{ con } \tilde{A}(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1}) \quad (33)$$

los polinomios E y F pueden ser obtenidos dividiendo 1 entre $\tilde{A}(z^{-1})$ hasta que el residuo pueda ser factorizado en la forma $z^{-j} \cdot F_j(z^{-1})$ y el cociente será el polinomio $E_j(z^{-1})$. Así en las ecuaciones (34) y (35) se muestra los factores de los polinomios E y F respectivamente.

$$E_1(z^{-1}) = 1$$

$$E_2(z^{-1}) = 1 + 1,5799z^{-1} \quad (34)$$

$$E_3(z^{-1}) = 1 + 1,5799z^{-1} + 1,9162z^{-2}$$

$$F_1(z^{-1}) = 1,5799 - 0,5799z^{-1}$$

$$F_2(z^{-1}) = 1,9162 - 0,9162z^{-1} \quad (35)$$

$$F_3(z^{-1}) = 2,1112 + 1,1112z^{-1}$$

El cálculo de la ley de control requiere de la obtención de la matriz G , la cual se obtiene por medio de:

$$g_j = - \sum_{i=1}^j a_i g_{j-1} + \sum_{i=0}^{j-1} b_i \text{ con } g_k = 0 \quad \forall k < 0 \quad (36)$$

siendo a_i y b_i los parámetros del numerador y denominador de la función de transferencia, se tiene:

$$g_0 = b_0 = 0,9378$$

$$g_1 = -a_1 g_0 + b_0 + b_1 = 1,4816 \quad (37)$$

$$g_2 = -a_1 g_1 - a_2 g_0 + b_0 + b_1 = 1,7910$$

Utilizando los valores obtenidos en (37) se arma la matriz G de la siguiente manera:

$$G = \begin{bmatrix} 0,9378 & 0 & 0 \\ 1,4816 & 0,9378 & 0 \\ 1,7910 & 1,4816 & 0,9378 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Las salidas predichas son calculadas por medio de la siguiente expresión:

$$y = Gu + F(z^{-1})y(t) + G'(z^{-1})\Delta u(t - 1) \quad (39)$$

donde:

$$y = \begin{bmatrix} \hat{y}(t + d + 1 | t) \\ \hat{y}(t + d + 2 | t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t + d + N | t) \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \vdots \\ \Delta u(t + N - 1) \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \cdots & g_0 \end{bmatrix}$$

$$G'(z^{-1}) = \begin{bmatrix} (G_{d+1}(z^{-1}) - g_0)z \\ (G_{d+2}(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1})z^2 \\ \vdots \\ (G_{d+N}(z^{-1}) - g_0 - g_1z^{-1} - \dots - g_{N-1}z^{-(N-1)})z^N \end{bmatrix}$$

$$F(z^{-1}) = \begin{bmatrix} F_{d+1}(z^{-1}) \\ F_{d+2}(z^{-1}) \\ \vdots \\ F_{d+N}(z^{-1}) \end{bmatrix}$$

Los dos últimos términos en (39) dependen del pasado, por lo que son agrupados en f .

$$y = Gu + f \quad (40)$$

donde f es la respuesta libre, la cual es posible calcular recursivamente mediante:

$$f_{j+1} = z(1 - \hat{A}(z^{-1})f_j + B(z^{-1})\Delta u(t - d + j)) \quad (41)$$

Los cálculos realizados previamente se reemplazan en (40), y se tiene la matriz de cálculo de las salidas predichas:

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(t+1|t) \\ \hat{y}(t+2|t) \\ \hat{y}(t+3|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9378 & 0 & 0 \\ 1,4816 & 0,9378 & 0 \\ 1,7910 & 1,4816 & 0,9378 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \Delta u(t+2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,5799y(t) - 0,5799(t-1) \\ 1,9162y(t) - 0,9162(t-1) \\ 2,1112y(t) - 1,1112(t-1) \end{bmatrix} \quad (42)$$

La expresión (18), con el fin de calcular la ley de control, puede ser escrita de la siguiente manera:

$$J = (Gu + f - w)^T(Gu + f - w) + \lambda u^T u \quad (43)$$

donde w es la trayectoria de referencia, así :

$$w = \begin{bmatrix} w(t+d+1) & w(t+d+2) & \cdots & w(t+d+N) \end{bmatrix}^T \quad (44)$$

Se puede reescribir (43) como:

$$J = \frac{1}{2}u^T H u + b^T u + f_0 \quad (45)$$

donde:

$$H = 2(G^T G + \lambda I)$$

$$b^T = 2(f - w)^T G$$

$$f_0 = (f - w)^T (f - w)$$

El parámetro de diseño respecto a restricciones para el control es nulo, por lo tanto el gradiente de J es igual a cero, y se tiene:

$$u = -H^{-1}b = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (w - f) \quad (46)$$

Al calcular $H^{-1}b$, se obtiene la siguiente matriz:

$$H^{-1}b = \begin{bmatrix} 0,3324 & 0,2010 & 0,0594 \\ -0,3242 & 0,1481 & 0,2010 \\ -0,0653 & -0,3242 & 0,3324 \end{bmatrix} \quad (47)$$

La señal de control que se envía actualmente al proceso, es el primer elemento del vector u , que es dado por:

$$\Delta u(t) = K(w - f) \quad (48)$$

donde K es la primera fila de la matriz $(G^T G + \lambda I)G^T$; por lo tanto se obtiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \Delta u(t) = & 0,0632w(t+1) - 0,0317w(t+2) - 0,0044w(t+3) + \dots \\ & \dots + 0,0056\Delta u(t-1) + 0,0065y(t) + 0,0050y(t-1) \end{aligned} \quad (49)$$

Finalmente para hallar la ley de control se despeja $u(t)$ de (49), teniendo:

$$\begin{aligned} u(t) = & 0,5632u(t-1) + 0,5315u(t-2) + 0,5271y(t) + 0,5327y(t-1) + \dots \\ & \dots + 0,5392w(t+1) + 0,5441w(t+2) + 0,5476w(t+3) \end{aligned} \quad (50)$$

La figura 14 muestra claramente como esta constituida la señal de control del GPC.

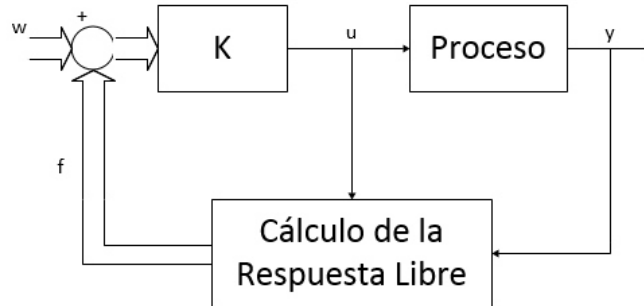


Figura 14: Ley de Control del GPC

3.3 Simulación del Sistema de Control

La simulación del control predictivo se realiza mediante un algoritmo elaborado en Matlab® (ver Anexo C2) el cual es generado a partir de los cálculos realizados en la sección 3.2.

La figura 15 muestra la señal de salida del sistema balasto-lámpara controlado, con una trayectoria de referencia establecida en 1.20V como tensión de salida; es importante recordar que el valor de tensión que se indica es el valor medio que se obtiene de la señal cuadrada correspondiente a la tensión de la lámpara, la misma que está atenuada para su acople al canal ADC del microcontrolador.

La señal de control también es dada por el código escrito en Matlab, esta señal es el ciclo de trabajo de la señal cuadrada. La figura 16 muestra la señal de control simulada.

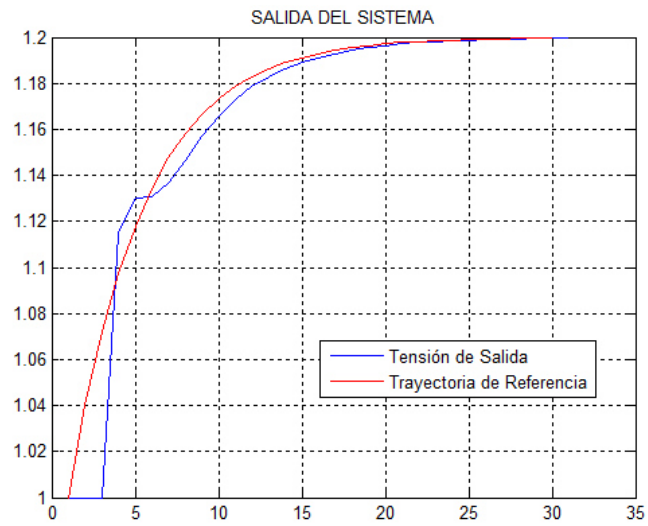


Figura 15: Señal de Salida del Sistema Balasto-Lámpara Controlado y Trayectoria de Referencia

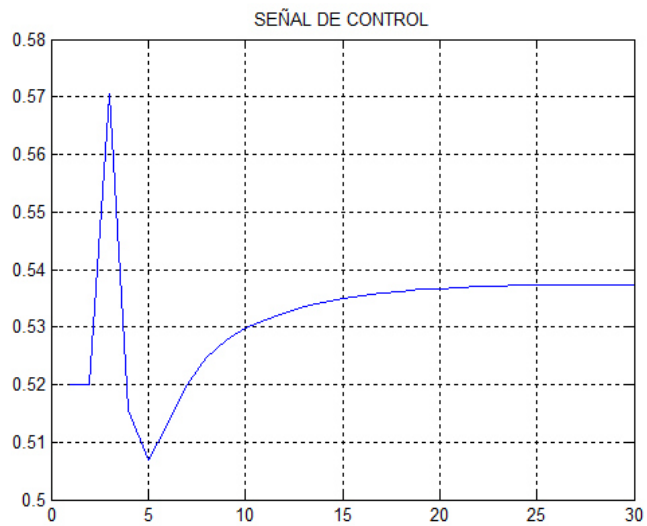


Figura 16: Señal de Control del Sistema Balasto-Lámpara

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA

4.1 Etapas del Balasto Electrónico

El balasto electrónico es el encargado del encendido, sensamiento y control de potencia de la lámpara HID - MH, en trabajos de investigación previos [15] y [21] se desarrolló el sistema de encendido de la lámpara y el convertidor buck-boost por separado. El presente proyecto realiza la integración de los dos sistemas antes mencionados y propone un nuevo circuito de sensamiento de tensión y un nuevo microcontrolador.

La figura 17 presenta el diagrama de bloques del balasto electrónico, el cual muestra las funciones principales de los distintos circuitos empleados. Las etapas de las que se compone el balasto electrónico son explicadas a continuación.

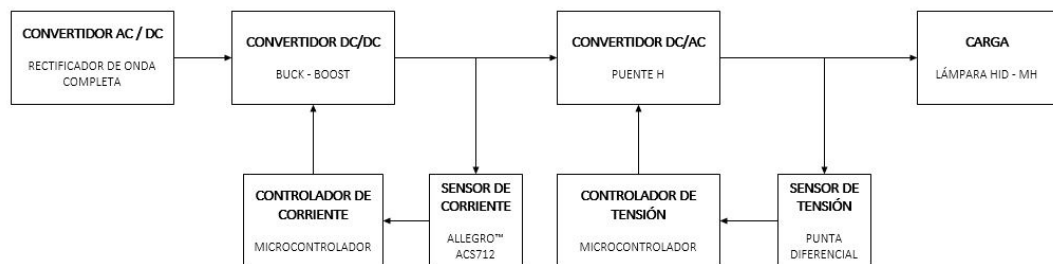


Figura 17: Diagrama de Bloques

4.1.1 Convertidor AC/DC

La tensión eléctrica común en nuestro país es de 110VAC por lo que se implementa un convertidor AC/DC con el fin de obtener un nivel de DC puro para la

correcta alimentación del convertidor DC/DC; la tensión DC que se obtiene luego de la conversión es de 167 VDC . El inicio de la conversión del tensión depende de un relé (RL1), el mismo que se activa cuando la fuente de alimentación DC se enciende.

La figura 18 representa el circuito esquemático del convertidor AC/DC, el circuito impreso se muestra en el anexo A y el diseño del convertidor en el anexo D. Los elementos utilizados en esta etapa son:

- 1 Puente de diodos BR86 (BR1)
- 2 Capacitores 1000 μ F - 450 V (C1 y C2)
- 1 Relé Omron G2R-1-E (RL1)
- 1 Fusible 3A (Fusible 1)

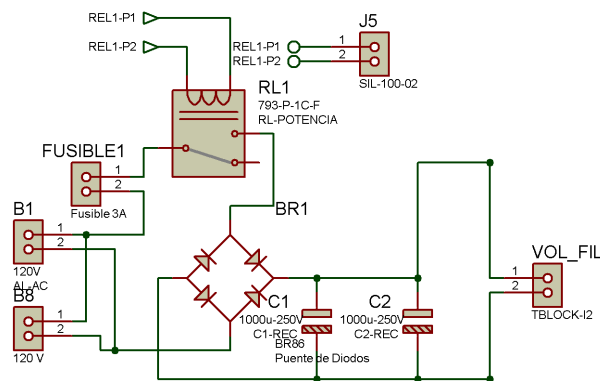


Figura 18: Circuito Esquemático del Convertidor AC/DC

4.1.2 Convertidor DC/DC

Este convertidor de tipo buck-boost es la fuente principal de alimentación de la lámpara HID-MH, el cual consta de las siguientes etapas:

Circuito de Potencia de convertidor Buck Boost

El desarrollo matemático para el diseño del convertidor se encuentra en la tesis de Salazar [21], el cual fue modificado para su adaptación a los requerimientos actuales. Los cálculos están descritos en el Anexo D.

La figura 19 representa el circuito esquemático implementado, mientras que el circuito impreso se muestra en el Anexo A. Los elementos utilizados en esta etapa son:

- 2 Semiconductores MOSFET IRFP460 (Q1, Q2).
- 2 Diodos rápidos FR3017 (D1 y D2).
- 2 Diodos híper rápidos RHRP1560 (D3 y D4).
- 1 Capacitor de 22 μ F 400 V (C1).
- 1 Bobina de 1.6 mH conectada en la bornera B2.
- 1 Carga inicial de 1 kohm 50 W.

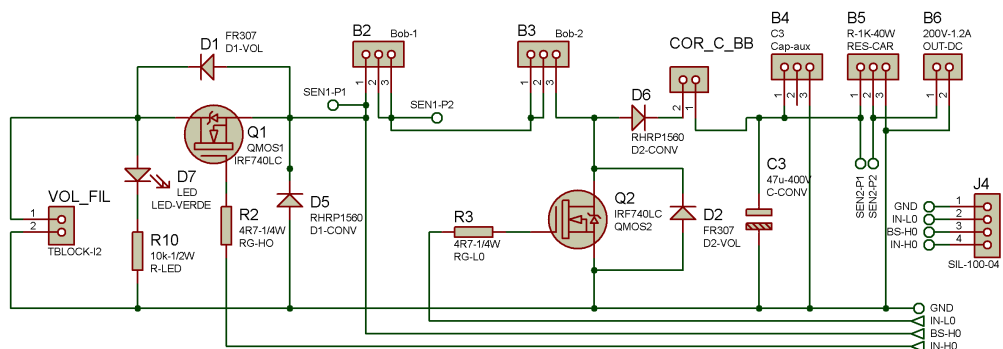


Figura 19: Circuito Esquemático de Potencia del Convertidor Buck Boost

Circuito de Activación de MOSFETS

En este circuito se encuentran varias tensiones para la alimentación de los circuitos integrados encargados de la activación de los MOSFETS, dando como salida del circuito las señales de activación correspondientes.

Los elementos utilizados para llevar a cabo esta etapa son:

- 1 Regulador de tensión 7815 (REG1)
- 1 Regulador de tensión 7812 (REG2)
- 1 Regulador de tensión 7805 (REG3)
- 2 TLP250 (DR-1 y DR-2)
- 1 Diodo ultra rápido HFA15TB60 (D10)
- 1 6N137 (DR-3)

La figura 20 representa el circuito esquemático implementado y en el anexo A muestra el circuito impreso.

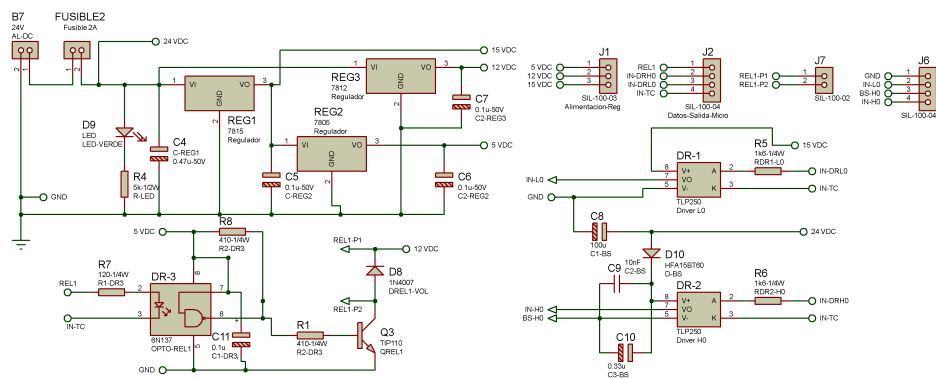


Figura 20: Circuito Esquemático de Activación de MOSFETS

Circuito de Control de Convertidor Buck Boost

Para el control del convertidor buck - boost se implementa la técnica de control por modos deslizantes, basado en la tesis de Salazar [21], con los siguientes elementos:

- 1 Microcontrolador PIC18F250

- 1 Sensor de efecto hall Allegro™ ACS712
- 1 Circuito integrado IR2110

La figura 21 representa el circuito esquemático implementado, mientras que el circuito impreso se muestra en el Anexo A.

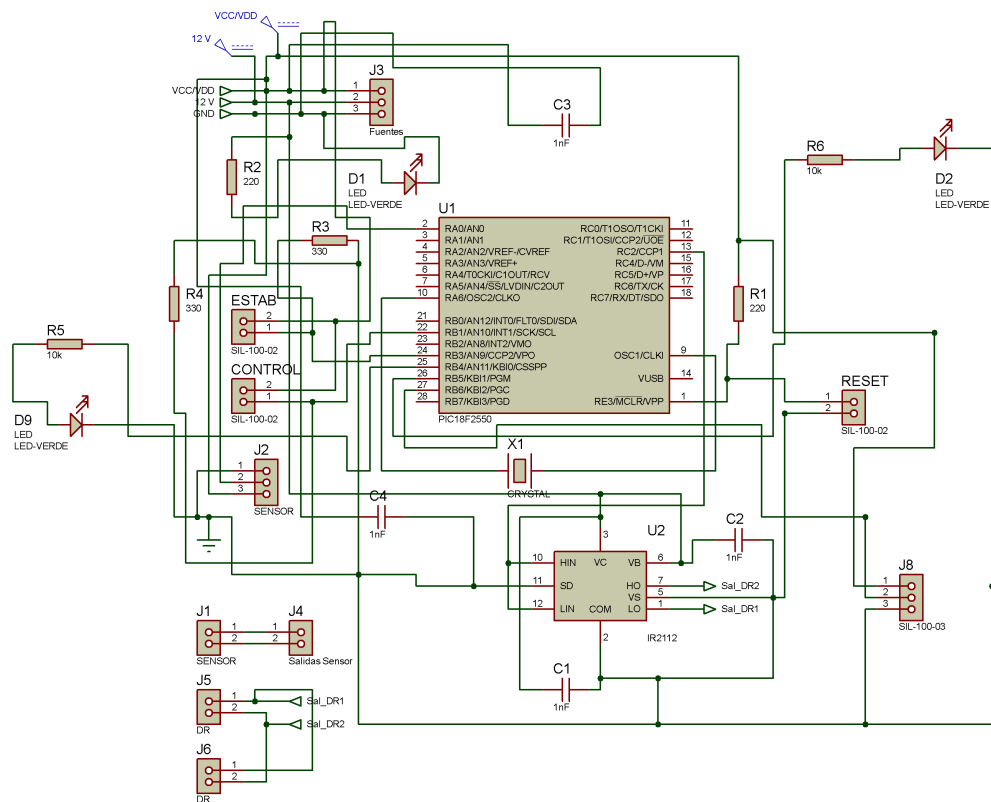


Figura 21: Circuito Esquemático de Control del convertidor Buck Boost

4.1.3 Convertidor DC/AC

En esta etapa se transforma la señal del bus DC que proviene del convertidor DC/DC a una señal alterna cuadrada de alta frecuencia para la alimentación de la lámpara HID-MH, este bloque consta de dos circuitos:

Circuito de Control de Puento H

La alimentación de este circuito es con una señal cuadrada de alta frecuencia que proviene de la etapa de control (explicada más adelante), esta señal es invertida y modificada en fase y amplitud. Este circuito entrega 4 señales: alto 1, bajo 1, alto 2 y bajo 2. Los componentes principales de este circuito son:

- 1 Compuerta lógica NOT 74LS04 (U3)
- 1 Circuito integrado IR2130 (IR1)
- 1 Potenciómetro de 5kohm para el acople de tierras.

La figura 22 representa el circuito esquemático utilizado y en el anexo A se encuentra el circuito impreso.

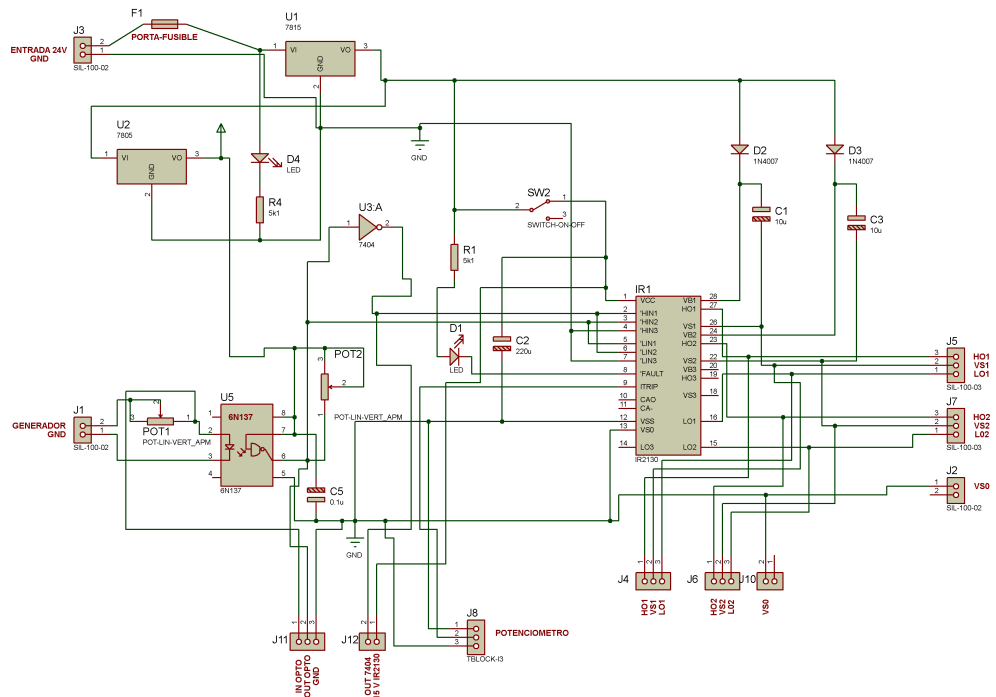


Figura 22: Circuito Esquemático de Control del Puento H

Circuito del Puesto H

Las señales alto 1, bajo 1, alto 2 y bajo 2 son recibidas por los MOSFET IRFP460 (Q1, Q2, Q3 y Q4), los cuales conforman el puente H del convertidor DC/AC, los mismos que son los componentes principales de este circuito.

La figura 23 muestra el circuito esquemático utilizado y en el anexo A se encuentra el circuito impreso.

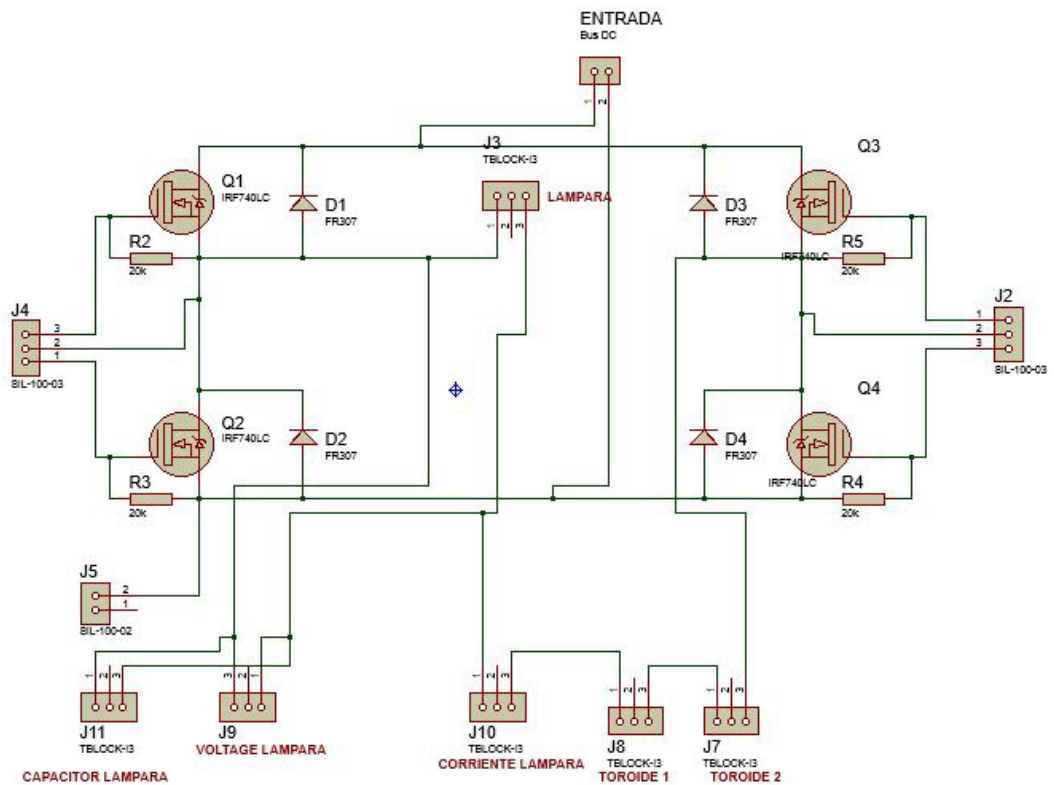


Figura 23: Circuito Esquemático de Puesto H

4.1.4 Etapa de Sensado

La etapa de sensado del balasto electrónico de la lámpara HID-MH es la encargada de medir la tensión en la lámpara, variable que será utilizada para el proceso de identificación y control del sistema balasto - lámpara.

Existen dos consideraciones a tener en cuenta para el diseño de la etapa de sensado:

- El acople de tierras (Circuito de Potencia y Circuito de Control), y
- El rango de medición del canal analógico del microcontrolador.

La tensión a ser medida usa la tierra del circuito de potencia y tiene un valor promedio de 139 V, mientras que el canal analógico del microcontrolador utiliza la tierra del circuito de control y tiene un rango de lectura de 0 V - 3 V. Basado en lo dicho se debe tener una etapa de sensado que conste con una entrada diferencial para la tensión en la lámpara y un circuito de acondicionamiento de señal que permita reducir la señal de tensión al rango permitido por el microcontrolador.

El circuito de sensamiento que permite cumplir el objetivo es el circuito de una punta diferencial de prueba [22], el mismo que es un arreglo de resistencias y capacitores en configuración con un amplificador operacional que permite reducir la tensión de entrada. La figura 24 muestra el circuito de la punta diferencial de prueba utilizada.

La etapa siguiente a la punta diferencial es un seguidor de tensión para acoplar la impedancia del circuito de sensamiento con el microcontrolador.

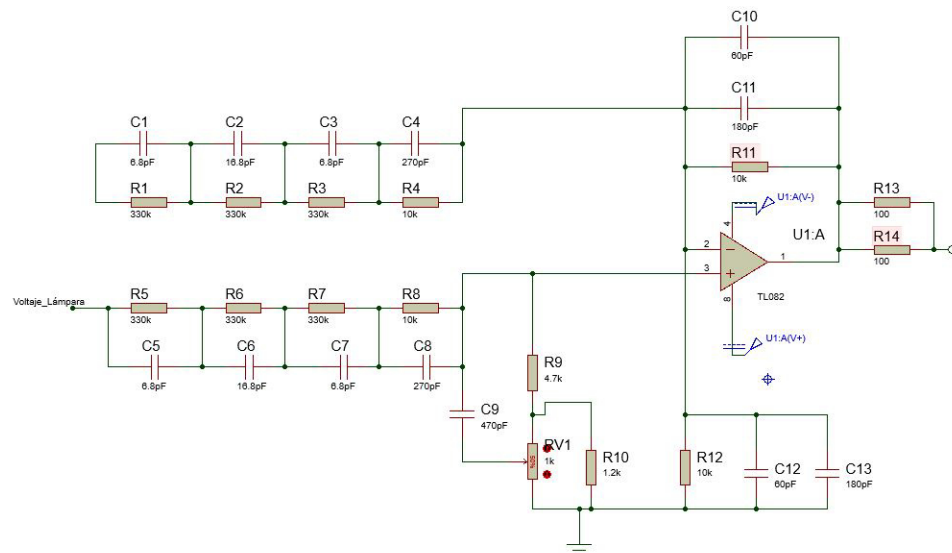


Figura 24: Circuito Punta Diferencial

La señal de salida de la punta diferencial tiene una parte negativa, para acondicionar dicha señal a lo permitido por el microcontrolador se diseñó un sumador inversor que adicione un nivel de offset para obtener una señal solamente positiva. El circuito de acondicionamiento implementado se muestra en la figura 25.

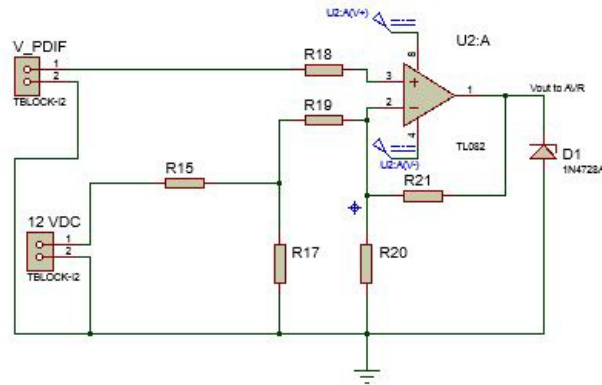


Figura 25: Circuito Acondicionamiento Punta Diferencial - AVR

La tensión de salida de un amplificador operacional sumador no inversor está representada por (51), donde V_1 es la señal cuadrada de 1,35 Vpp centrada en el 0 que sale de la punta diferencial y V_2 será la tensión a ser sumado para tener una señal netamente positiva.

$$V_{out} = \frac{R_{21}}{R_{18}}V_1 + \frac{R_{21}}{R_{19}}V_2 \quad (51)$$

$$V_1 = 1,35V$$

$$V_2 = 1V_{DC}$$

Las fuentes de alimentación que se tienen en el balasto electrónico son fijas, por lo que para obtener V_2 se realiza un divisor de tensión. Los cálculos para el divisor son:

$$V_2 = \frac{R_{17}}{R_{15} + R_{17}}V_{in}$$

$$1V = \frac{10k\Omega}{R_{15} + 10k\Omega}12V$$

$$R_{15} + 10K\Omega = 120k\Omega$$

$$R_{15} = 110k\Omega$$

La ganancia del amplificador es de uno, ya que se desea una señal netamente positiva y de una amplitud máxima de 3,3 V_{pp}, así:

$$R_{18} = R_{19} = R_{20} = R_{21} = 10k\Omega$$

Se reemplazan los valores de las resistencias en (51) y se tiene:

$$V_{out} = \frac{10k\Omega}{10k\Omega}V_1 + \frac{10k\Omega}{10k\Omega}V_2$$

$$V_{out} = 1,35V$$

Finalmente para asegurar que no existan tensiones mayores a las permitidas en la entrada del microcontrolador se colocó un diodo zener de 3V, quedando el circuito de sensado como se muestra en la figura 26.

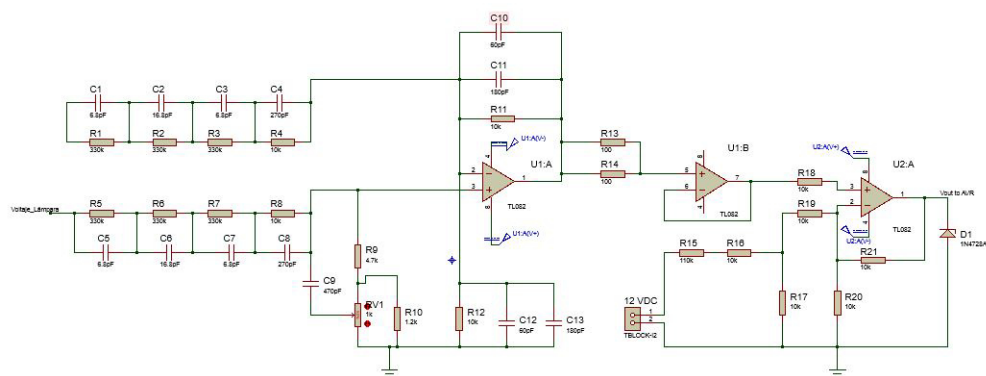


Figura 26: Circuito de Sensado

4.1.5 Etapa de Control

La etapa de control requiere de un dispositivo electrónico que permita la implementación de un controlador adaptativo - predictivo, para la elección del mismo se debe tomar en cuenta los siguientes requerimientos mínimos:

- Una capacidad de memoria RAM que permita realizar operaciones como: la inversa, transpuesta, suma, resta y multiplicación de matrices de 3x3, también debe permitir realizar cálculos recursivos que implican como mínimo 5 matrices de 300 datos cada una.
- Un convertidor análogo - digital que permita detectar los cambios de tensión en la lámpara, para esto se debe tener en cuenta que la variación de tensión en la lámpara es de 0 - 167 V y la variación que se refleja en la lectura del canal ADC es de 1 - 1.67 V, es decir, el cambio mínimo que debe detectar el convertidor ADC es de 1mV.
- Generación de una señal PWM de 31 kHz.
- Procesador cuya velocidad sea al menos 10 veces menor al tiempo de muestreo requerido ($t_m = 1ms$).
- Capacidad de memoria para almacenar: 610 variables tipo int, 2410 variables tipo double, y 170 variables tipo float; además de 30 variables auxiliares.

El análisis se realizó entre tres dispositivos: Arduino MEGA, XMEGA-A1 Xplained Board y STM32F4 Discovery Board, de los cuales se escogió la tarjeta STM32F4 Discovery ya que cumple con los requerimientos mínimos impuestos previamente. Dentro de las características principales de la tarjeta elegida se tiene:

- 1 Mb de memoria Flash

- 192 kb de memoria RAM
- Procesador ARM Cortex - M4 32 bit y núcleo de 168 MHz.
- 3 Convertidores Analógico - Digital de 12 bits de resolución.
- 17 Timers
- Entradas y Salidas Digitales multipropósito.
- Alimentación 5V USB o con fuente externa.

La figura 27 muestra la apariencia física de la tarjeta STM32F4 Discovery, en el anexo E se muestran la hoja de datos, donde se aprecian todas las características de las tarjeta incluidas las antes mencionadas.

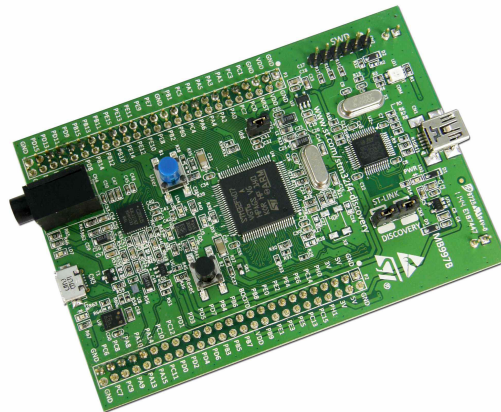


Figura 27: Tarjeta STM32F4 - Discovery

Programación del Controlador

La programación de la tarjeta STM32F4 Discovery se ha desarrollado en el software de programación conocido como Coocox IDE, este utiliza un compilador GCC que permite programar el microcontrolador de la tarjeta elegida.

El código de programación tiene como paso previo el diagrama de flujo; el mismo que se muestra en la figura 28 y que representa el funcionamiento del

controlador adaptativo - predictivo del sistema balasto - lámpara. El anexo C2 describe el código de funcionamiento del control adaptativo - predictivo.

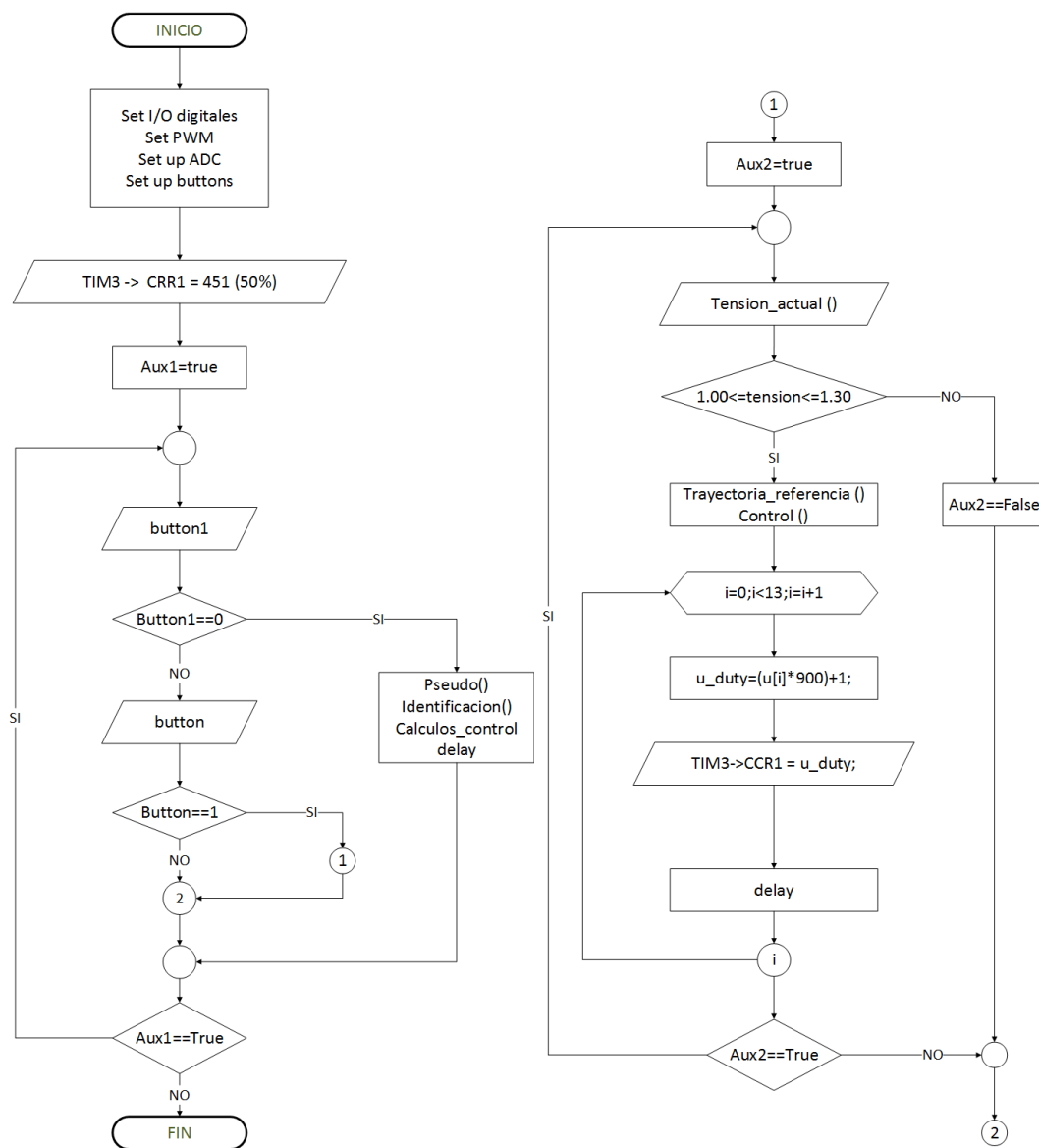


Figura 28: Diagrama de Flujo del Control Adaptativo - Predictivo

La figura 29 muestra el circuito esquemático utilizado y en el anexo A se encuentra el circuito impreso.

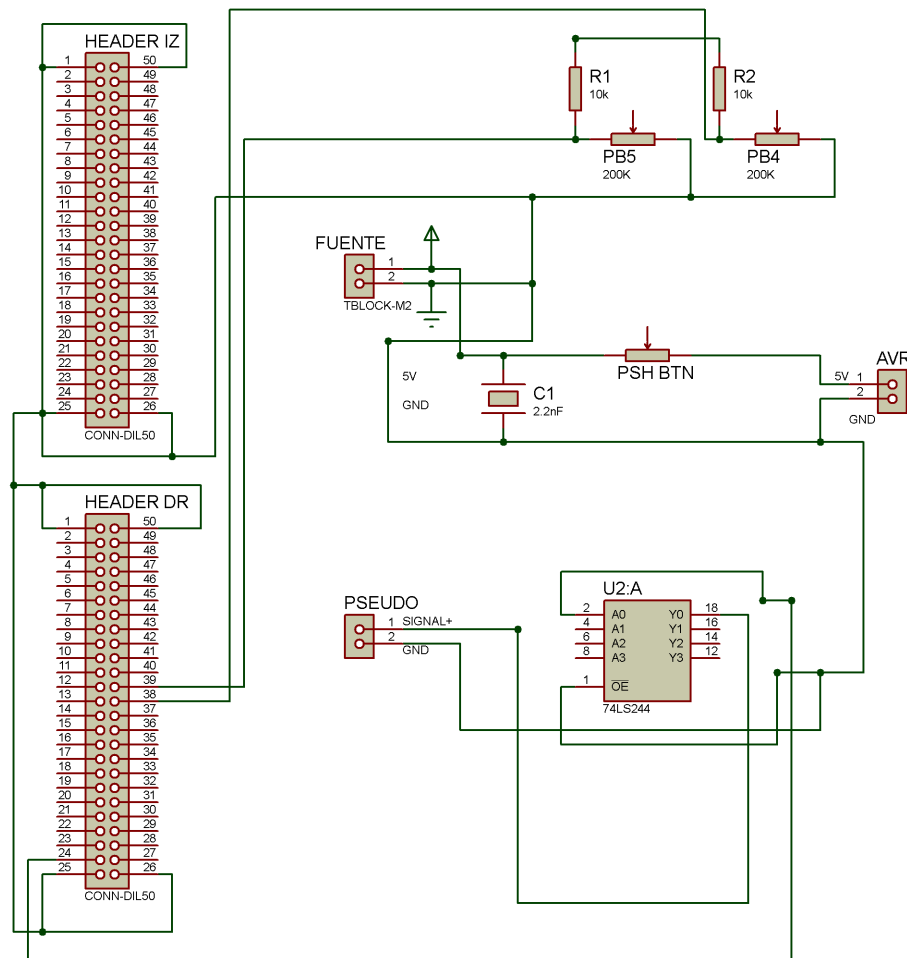


Figura 29: Circuito Esquemático para la Tarjeta STM32F4 Discovery

4.1.6 Circuitos Adicionales

Fuentes de Alimentación

Para la alimentación de los diferentes circuitos se ha incorporado una placa que entrega diferentes tensiones de salida distribuidas en 8 borneras. La tensión de alimentación de esta placa es 18 VAC, y esta conformada por los siguientes elementos:

- 1 transformador 127 / 18 VAC, 500 mA

- 1 Capacitor 470 μ F (C1)
- 1 Rectificador de onda completa 2W02G (BR1)
- 1 Regulador 7815 (REG1)
- 1 Regulador 7805 (REG2)
- 1 Regulador 7812 (REG3)

En la figura 30 se muestra el circuito esquemático utilizado y en el anexo A se encuentra el circuito impreso.

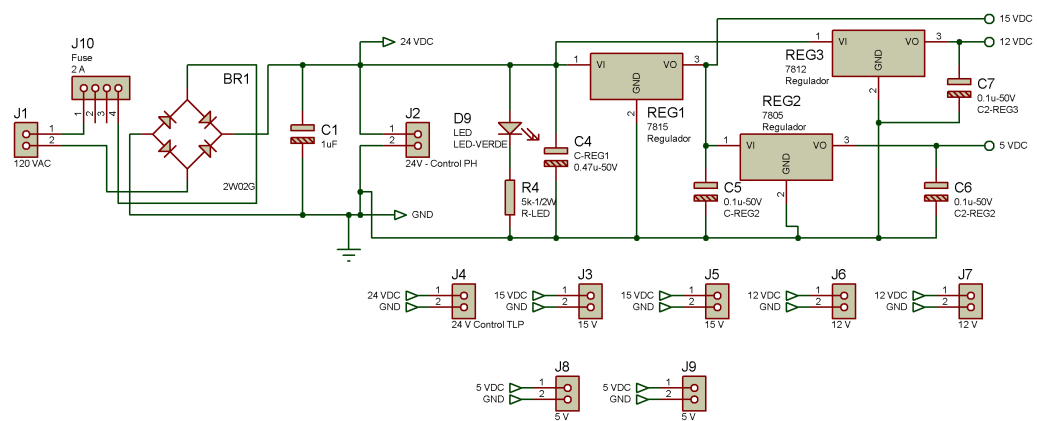


Figura 30: Circuito Esquemático de Fuentes de Alimentación

Circuito de Arranque

El proceso de ignición de la lámpara HID - MH necesita una resistencia de 20 ohm 50 W, la cual es retirada por medio de un interruptor SW1 una vez que el led verde de la figura 21 se encienda, caso contrario la lámpara no trabaja de manera adecuada.

La figura 31 muestra el diagrama de conexión de este circuito.

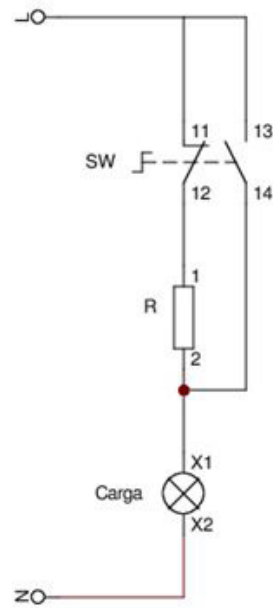


Figura 31: Circuito de Arranque

Finalmente el balasto electrónico real implementado se muestra en la figura 32.

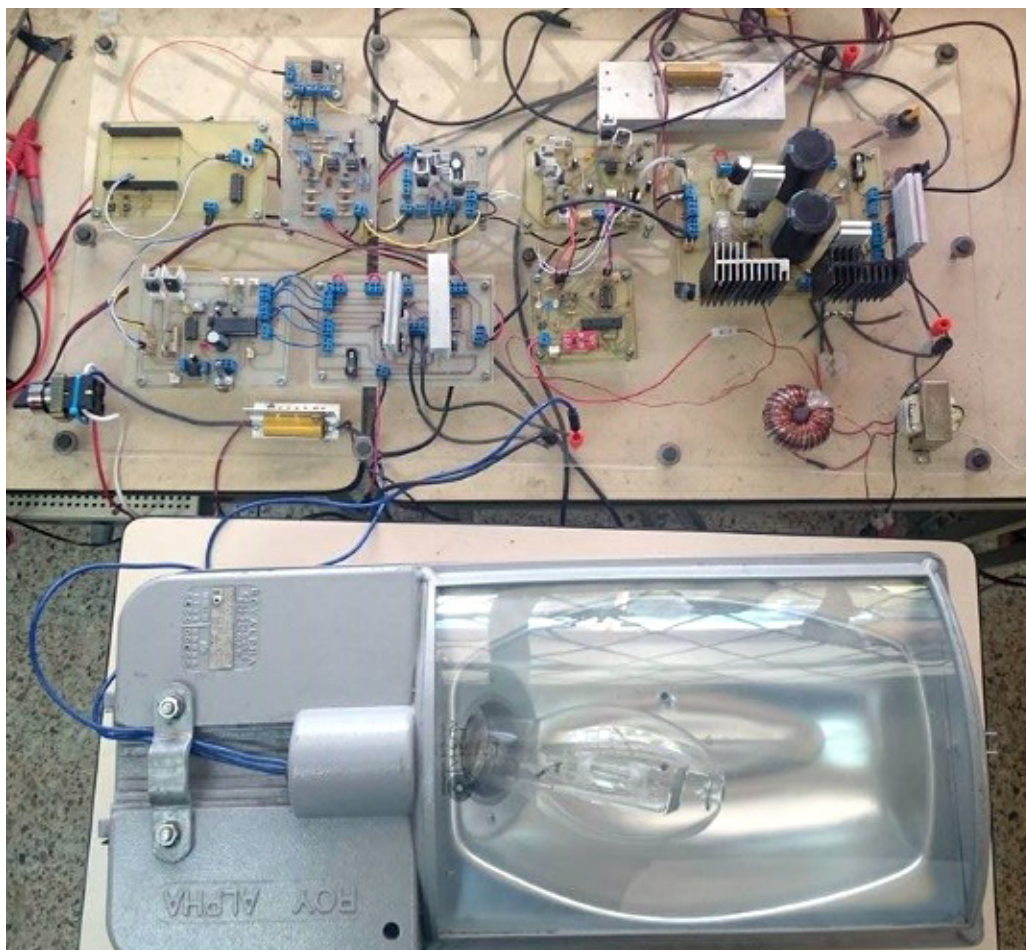


Figura 32: Balasto Electrónico Implementado para la Lámpara HID - MH

4.2 Pruebas del Sistema y Análisis de Resultados

Las pruebas que se realizaron en el sistema balasto - lámpara fueron hechas antes y después de la implementación del controlador, también se obtuvo la planta discreta del sistema usando el método MMCARX con el fin de contrastar los resultados con los datos experimentales obtenidos. A continuación se detalla las pruebas realizadas y posteriormente se realiza el análisis de las mismas.

4.2.1 Modelo Matemático del Sistema Balasto - Lámpara

El modelo matemático obtenido en (32) fue sometido a una prueba de simulación con el fin de contrastar los datos simulados con los que se obtuvo experimentalmente con el método fuera de línea.

La simulación consiste en excitar a la planta con la misma señal utilizada de manera experimental, siendo esta la SBPA diseñada en el capítulo 3 conformada por 300 datos. El comando filter de Matlab permitió la simulación de los datos de salida tomando en cuenta la planta (32) encontrada con el algoritmo MMCARX.

La figura 33 muestra el contraste de los datos simulados versus los datos experimentales, sobre los cuales se calcula el porcentaje de ajuste con el código desarrollado en Matlab que se muestra en el anexo C, siendo el resultado el que se muestra en (52).

$$fit = 89,59 \% \quad (52)$$

El porcentaje de ajuste nos indica la eficiencia del modelo matemático hallado, al este ser el 89.59 % se puede decir que este es eficiente ya que supera el 80 %.

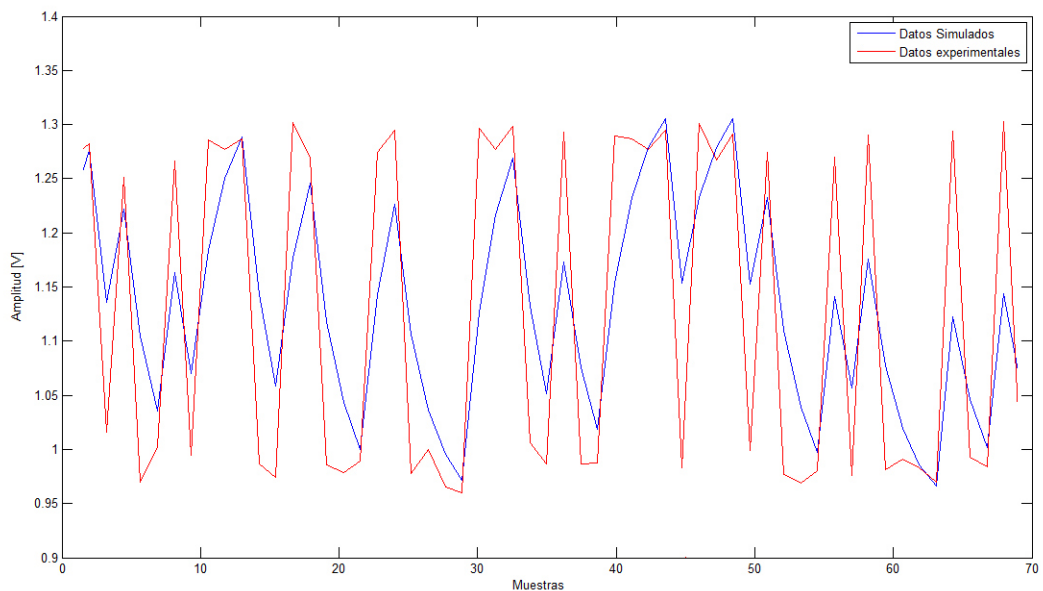


Figura 33: Datos Tensión Simulados vs Datos Tensión Reales

4.2.2 Controlador del Sistema Balasto Electrónico - Lámpara para HID - MH

El análisis de funcionamiento del controlador aplicado al sistema balasto - lámpara se realiza en base a la respuesta de la planta ante una perturbación. El objetivo es constatar la mejora del sistema al utilizar una técnica de control, por lo que se efectuó pruebas con el sistema controlado y el sistema sin controlar, las mismas que serán descritas a continuación.

La perturbación que se utilizó para esta prueba es un escalón de tensión de 5 voltios, es decir, una perturbación de 8.95 vatios; la prueba se realizó una vez que el sistema ha alcanzado una potencia de 250 W. La figura 34 muestra la respuesta del sistema sin controlar ante la perturbación, mientras que la figura 35 presenta el comportamiento de la planta controlada ante la misma señal de excitación.

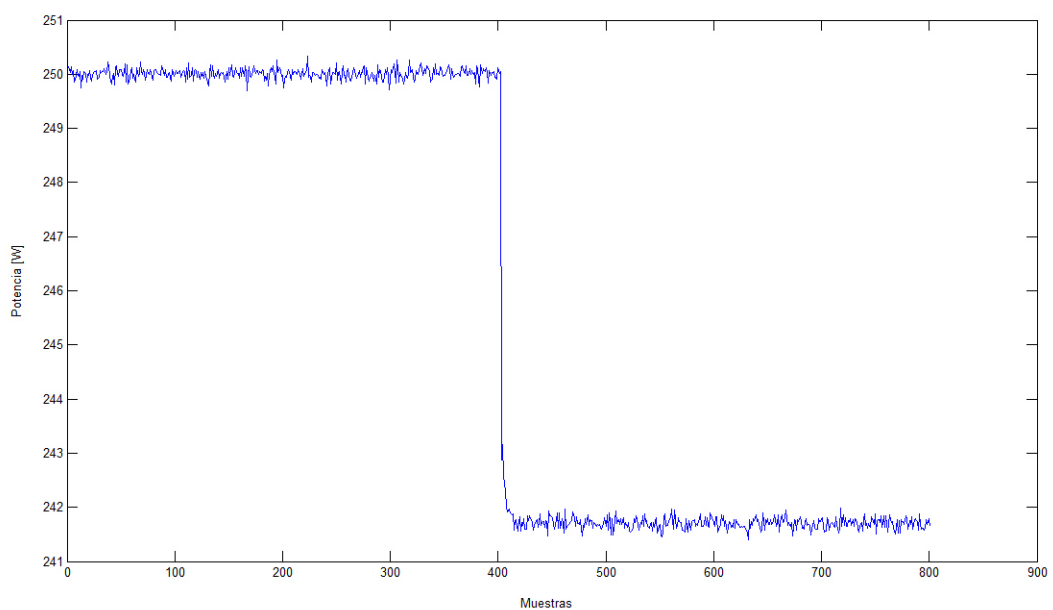


Figura 34: Respuesta al Escalón de la Planta Sin Control

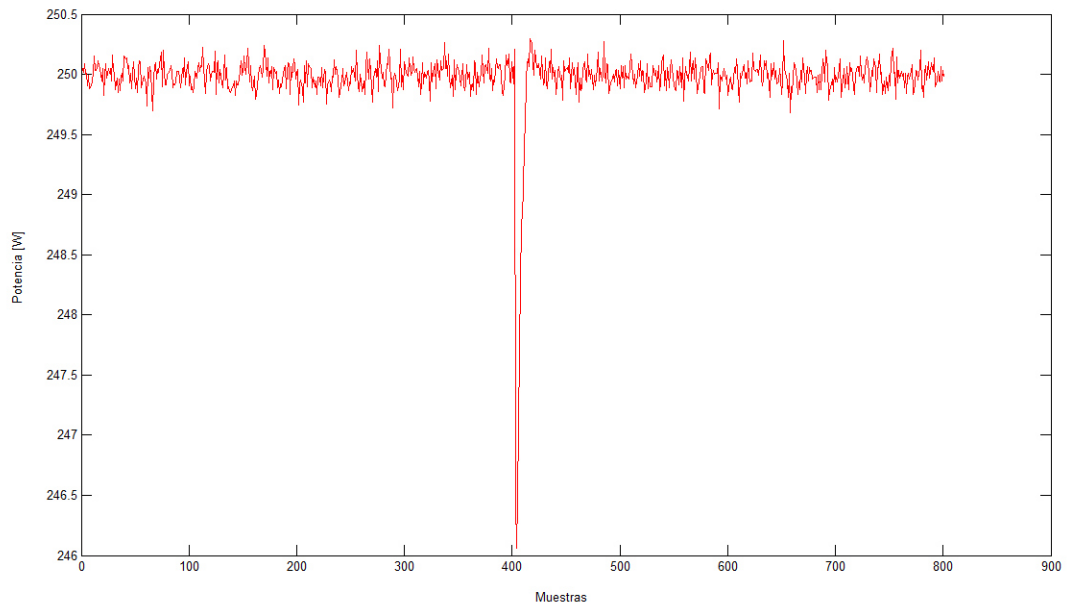


Figura 35: Respuesta al Escalón de la Planta Controlada

Al analizar la respuesta de la planta sin control se nota claramente que la potencia disminuye instantáneamente de 250 vatios a 241.5 vatios; mientras que la presencia de la perturbación en el sistema controlado forma un pico de 246 vatios, el mismo que gracias a la acción del control adaptativo - predictivo, es decir, a una variación del ciclo de trabajo es controlado permitiendo que la planta retome la potencia deseada (250 W).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

- El correcto funcionamiento del control adaptativo - predictivo establece una ley de control que ajusta a los parámetros del sistema identificado mediante el algoritmo de mínimos cuadrados ARX.
- El sistema balasto – lámpara ha sido identificado paramétricamente y en línea alcanzando un porcentaje de identificación 89.59 % con el algoritmo MMCARX para una planta de primer orden.
- El control adaptativo – predictivo implementado permitió mejorar la eficiencia del sistema balasto – lámpara en un 29.59 % en comparación al balasto electromagnético, siendo la eficiencia de este último de 60 %.
- La acción de control aplicada realiza una corrección inmediata ante la presencia de perturbaciones, la misma que hace una compensación de ciclo de trabajo evitando la presencia de flicker en la lámpara ya que se mantiene la potencia de consumo de la lámpara.
- El circuito de sensado de tensión implementado en el hardware del balasto presenta una mínima influencia electromagnética al momento de leer la tensión que permite tener un porcentaje de identificación mayor al 80 %.

- El rediseño del convertidor buck - boost y la técnica de control por modos deslizantes aplicada a este, permitió cumplir las fases de encendido del sistema para posteriormente mantener una corriente constante en la lámpara HID - MH, posibilitando así el control de su potencia.
- El desgaste físico de la lámpara HID – MH es menor cuando se aplica una técnica de control, ya que esta evita que el plasma toque las paredes de la ampolla que lo contiene.

5.2 Recomendaciones.

- La técnica de control a implementar debe considerar que el ciclo de trabajo tiene que permanecer simétrico al 50 %, es decir, si la acción de control está al 40 % durante un milisegundo el siguiente milisegundo debe estar al 60 %, con el fin de evitar la presencia de flicker en la lámpara HID - MH.
- El horizonte de predicción dependerá del sistema al cual se emplea el control, por lo que se recomienda simular la planta controlada previo a la implementación del mismo.
- Las características mínimas que se requiere para implementar cualquier técnica de control deben ser analizadas previo a la adquisición del dispositivo de control.
- La sintonización de la identificación requiere de la toma de datos fuera de línea por lo que se recomienda establecer la comunicación serial una vez apagada la lámpara, ya que si se establece la comunicación mientras la lámpara está encendida esta no funciona por la influencia del ruido sobre la tarjeta del controlador.

Bibliografía

- [1] A. Aguado and M. Martínez. *Identificación y Control Adaptativo*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2003.
- [2] Rosendo Flores Hernández. Modelado dinámico de lámparas de alta intensidad de descarga. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2007.
- [3] Edward E. Deng. *I. Negative incremental impedance of fluorescent lamp*. PhD thesis, California Institute of Technology, 1995.
- [4] R. Osorio, M. Oliver, M. Ponce, Juárez, and Olivares V. Análisis de estabilidad para lámparas de hid utilizando un modelo no lineal. *AMCA*, 2004.
- [5] R. Flores. Modelo dinámico de lámparas de alta intensidad de descarga. Master's thesis, CENIDET, 2007.
- [6] Javier Correa Gómez. Estrategias de control en lámparas de alta presión para la eliminación de resonancias acústicas. Master's thesis, CENIDET, 2004.
- [7] Gilberto Enríquez Harper. *El ABC del alumbrado y las instalaciones eléctricas en baja tensión*. Editorial LIMUSA S. A., 2004.
- [8] William D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, Volumen 2*. 2007.

- [9] S.Larousse. *Diccionario Enciclopédico Vox 1*. 2009. URL <http://es.thefreedictionary.com/electroluminiscencia>.
- [10] Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*. DRAE, 2012. URL <http://lema.rae.es/drae/?val=fotoluminiscencia>.
- [11] J. Acosta and J. Moreno. *Diseño de iluminación inteligente para una tienda comercial*. ESIME-IPN, 2009.
- [12] Irene Guerrero Mora. Balastro electrónico para lámpara fluorescente basado en un amplificador clase e operando a una frecuencia mayor a 1mhz. Master's thesis, CENIDET, 2002.
- [13] Cristian Morillo. Diseño del sistema de automatización para un edificio inteligente. Master's thesis, Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [14] Efrén Flores García. Estudio e implementación de un inversor no resonante como balastro electrónico para lámparas de descarga. Master's thesis, CENIDET, 2004.
- [15] William Chicaiza and Carolina Barrionuevo. *Control Adaptativo de una Lámpara HID-MH de 250 W*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2013.
- [16] Cristian Kunusch. Identificación de sistemas dinámicos. page 33, 2003.
- [17] Juan M. Sánchez. *Adaptative-predictive control*, 1982.
- [18] E. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control*. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 1998.
- [19] Guillermo Valencia. Aplicación del control predictivo multivariable a una columna de destilación binaria. Master's thesis, CENIDET, 2006.

- [20] P. Ayala, C. Bernal, S. Guerra, and A. Fernández. Identificación de sistemas basado en re-muestreo de señales periódicas implementado en fpga. *Revista Energética Universidad Nacional de Colombia*, 2014.
- [21] Pablo Salazar. *Diseño e Implementación de un Control por Modo Deslizante para un Convertidor Buck Boost DC/DC*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, 2012.
- [22] Prosje. Diffprobe. URL <http://prosje.be/C0/Schemas/DiffProbe.png>.

ANEXO A

CIRCUITOS IMPRESOS

ANEXO B

GRÁFICAS DE IDENTIFICACIÓN ADAPTATIVA CON HERRAMIENTA IDENT DE MATLAB®

ANEXO C

ALGORITMOS

ANEXO D

HOJAS TÉCNICAS

ANEXO E

CÁLCULOS DEL CONVERTIDOR BUCK-BOOST

ACTA DE ENTREGA

El proyecto de grado denominado "*Diseño e Identificación de un Control Adaptativo - Predictivo Basado en Modelo para un Balastro Electrónico para una Lámpara HID-MH*", fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, desde:

Sangolquí, ¹⁹ de Marzo de 2015.

ELABORADO POR:



Diana Carolina Pasaca Guerrero

171793049-7



Nathalie Alexandra Pérez Goyes

060418843-3

AUTORIDAD:



Ing. Luis Orozco MSc.



DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL