

Diseño e Implementación de un controlador Fuzzy para un balasto electrónico de una lámpara HID-MH de 250W.

Giovanny Regalado , Nestor Villacis, Victor Proaño, Paul Ayala.

Resumen—Se propone un balasto electrónico para una lámpara HID-MH de 250W conformado por tres etapas: un rectificador de onda completa, convertidor CD-CD Buck Boost y un inversor en puente completo que produce una onda cuadrada de alta frecuencia (90Khz a 110Khz). Un controlador fuzzy implementado en un microcontrolador, por el comportamiento no lineal y la variación caótica de los parámetros de la lámpara, se ha propuesto como estrategia de control para mantener la corriente constante en la carga, con el objetivo de operar a la lámpara libre de resonancias acústicas.

Index Terms—HID, Control Fuzzy, resonancia acústica, balasto electrónico

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el mercado existen diferentes tipos de lámparas que se emplean como fuentes de luz, las lámparas HID son una de ellas, estas lámparas son usadas para cubrir diferentes requerimientos de iluminación gracias a sus deseadas características como: elevada eficacia luminosa, alto índice de reproducción de color, elevada temperatura de color y elevado tiempo de vida[1]. La estructura general de este tipo de lámparas se conforma de una ampolla exterior, un tubo de descarga, dos electrodos y un casquillo como se muestra en la Figura 1. La ampolla contiene al tubo de descarga y en los extremos se ubican los electrodos. El interior del tubo de descarga contiene el gas de relleno a alta presión (0.98 bar). También, en un extremo de la ampolla se encuentra un casquillo por donde se conecta la lámpara a la fuente de energía eléctrica[2].

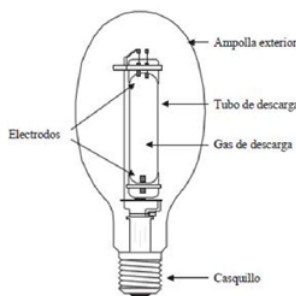


Figura 1: Estructura general de la lámpara HID.

Las lámparas HID-MH son eficientes, tienen una larga vida útil, proveen una luz de buena calidad y son de tamaño reducido a pesar de ello, este tipo de lámparas se han venido operando con balastos electromagnéticos que presentan algunas desventajas: gran peso y tamaño, baja eficiencia, alta

sensibilidad a las variaciones de tensión de alimentación, lo que produce parpadeo en el arco de descarga (flicker). El operar éstas lámparas a altas frecuencias generan una serie de beneficios como: la reducción en volumen y peso de los componentes electrónicos del balasto, capacidad de dimerización, entre otras; sin embargo el desarrollo de balastos electrónicos para las lámparas de alta descarga se ha visto limitado por el fenómeno de resonancia acústica [2], que se presenta visualmente como la deformación del arco eléctrico dentro del tubo de descarga, manifestándose como un parpadeo en la luz generada por la lámpara. Este fenómeno se presenta cuando existen modulaciones en la potencia de la lámpara al operar a una determinada frecuencia a la cual se la conoce como frecuencia característica. Las modulaciones provocan la aparición de ondas de presión estacionarias dentro del gas de relleno produciéndose un crecimiento exagerado en la longitud del arco que provoca una sobre tensión y una posible extinción del mismo o en casos extremos la destrucción de la lámpara. La causa de la resonancia acústica es debido a varios factores como: la geometría del tubo de descarga, la presión del gas de llenado, la dispersión de la manufactura, la potencia de la lámpara, la temperatura de operación, la frecuencia de operación y los modos propios de resonancia acústica de la cavidad, todos estos parámetros son cambiantes en el tiempo y en consecuencia se tiene un comportamiento no lineal. Es por la dificultad de definir un comportamiento dinámico del conjunto balasto lámpara que se propone diseñar e implementar un controlador difuso, esto bajo la premisa de proveer una corriente constante a la lámpara, pretendiéndose eliminar las posibles resonancias acústicas a la frecuencia de operación, así como el mejoramiento de las especificaciones de la lámpara como son: el tiempo de vida, la intensidad luminosa, la eliminación del parpadeo o flicker [1] y la reducción del peso y el tamaño del balasto electrónico.

II. BALASTO ELECTRÓNICO.

Los balastos electrónicos son dispositivos diseñados para encender y regular las lámparas de descarga operando a altas frecuencias[7], capaces de proveer la tensión y corriente requeridos para el calentamiento y operación de las mismas.[6] Los balastos electrónicos están compuestos de grupos de componentes electrónicos que convierten la tensión CA de la red pública a CD, pasando por un convertidor CD a CD el cual funciona como un elevador o reductor de tensión y un corrector del factor de potencia. Posteriormente la salida

del convertidor buck-boost se conecta a un inversor de alta frecuencia que alimenta la lámpara. En la Figura 2 se presenta el esquema del balasto electrónico propuesto.

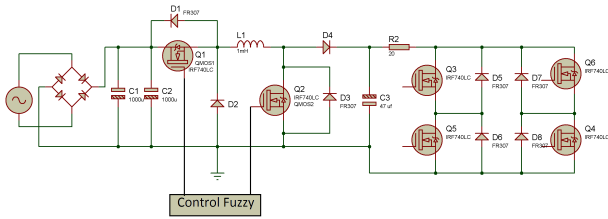


Figura 2: Esquema balasto electrónico propuesto.

Para el caso del convertidor CA-CC se ha empleado un rectificador no controlado de puente completo, en el que su salida de CC presenta un rizado no mayor al 5% como criterio de diseño.

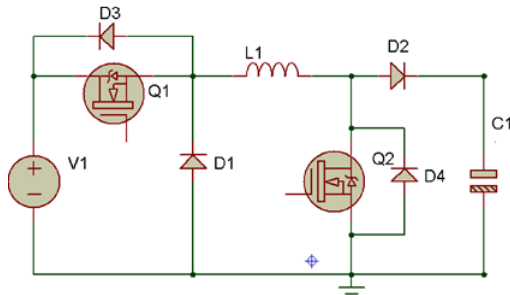


Figura 3: Buck-Boost no invertido.

La siguiente etapa es un convertidor buck-boost no invertido conforme se presenta en la Figura 3, el mismo está compuesto de un convertidor elevador y un reductor en cascada compartiendo el inductor, puede entregar a su salida una tensión mayor o menor a la suministrada por el rectificador variando el ciclo de trabajo de la señal de control. Las señales de conmutación de los mosfet (IRF740) empelados en el convertidor buck-boost son suministradas por un driver TLP 250. Esta onda cuadrada de alta frecuencia, 32 KHz y un ciclo de trabajo variable, proviene del controlador Fuzzy conforme el diseño del controlador lo establece, esta etapa también cuenta con un circuito de alimentación bootstrap el cual está formado por un diodo (DBS) y un capacitor bootstrap (CBS), esta configuración es necesaria para que el circuito de excitación sea flotante respecto a la tierra del circuito y pueda existir una activación en el mosfet Q1. Para el mosfet Q2 no es necesario una tierra flotante ya que se encuentra conectado a la tierra real. Hay que considerar que la señal control proveniente del control fuzzy es la misma para los dos mosfet Q1 y Q2 y que el driver TLP 250 provee los tiempos muestros necesarios en las conmutaciones para no producir un funcionamiento erróneo del convertidor.

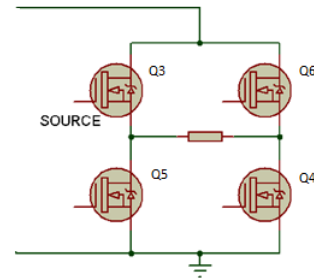


Figura 4: Inversor en puente completo.

La última etapa consiste de un inversor en configuración puente completo, Figura 4 que funciona en forma bipolar, este es alimentado por la salida del convertidor buck-boost. Las señales de conmutación de los mosfet (IRF740) utilizados en el inversor son suministradas mediante un driver IR2130 el cual suministra una onda cuadrada de alta frecuencia en el rango de 90 a 110 KHz proveniente de un micro controlador 18f2550 utilizado únicamente como un generador de frecuencia.[3] En la etapa del controlador se tiene también el censado de la corriente que se lo hace por medio de un sensor de efecto hall, allegro ACS712, este es un sensor que tiene aislamiento galvánico, lo que asegura la integridad de la etapa de control del sistema y entrega una señal de tensión lineal proporcional a la corriente sensada (corriente en la lámpara). El control fuzzy se encuentra implementado en un segundo microcontrolador de gama alta 18f2550.

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR FUZZY

El diseño de un controlador difuso se basa en el conocimiento del diseñador que tiene acerca de la planta, en este caso el sistema balasto-lámpara, sin tomar en cuenta el modelo matemático de la misma,[5] el controlador fuzzy propuesto está conformado por una entrada, el error de la corriente en el balasto 1 y una salida, el ciclo de trabajo (2 a una frecuencia constante en el convertidor buck boost, siendo la variable manipulada el ciclo de trabajo, ya que al variar éste, se produce una variación proporcional en el bus de CD que alimenta el inversor en configuración puente completo.

Entrada.

$$e = I_{med} - SP \quad (1)$$

Donde:

e	Error en la corriente de la lámpara
I_{med}	Corriente medida en la lámpara
SP	Valor deseado de corriente

Salida.

$$D = \frac{t}{T} \quad (2)$$

Donde:

D	Ciclo de trabajo (Duty)
t	Tiempo en que la onda cuadrada es positiva
T	Periodo de la onda cuadrada

III-A. Fusificación.

El primer paso para el diseño del controlador difuso es la fusificación, es necesario definir los conjuntos difusos que serán empleados de tal manera que se puedan definir las variables de entrada y salida, así mismo es necesario definir los grados de pertenencia para cada una de las variables de control. Tanto para las variables de entrada y salida se utilizan cinco conjunto difusos, definidos por las variables lingüísticas[5, 8] que se presentan en la Tabla I.

Cuadro I: Variables lingüísticas

Error en la corriente de la lámpara	
GN	Grande Negativo
PN	Pequeño Negativo
Z	Cero
PP	Pequeño Positivo
GP	Grande Positivo

Incremento en ciclo de trabajo	
GN	Grande Negativo
PN	Pequeño Negativo
Z	Cero
PP	Pequeño Positivo
GP	Grande Positivo

El número de conjuntos difusos definidos depende de la resolución necesaria para la aplicación, entre mayor cantidad de conjuntos difusos será mayor la resolución del controlador, sin embargo al incrementarse el número de reglas también se incrementará el costo computacional. Se propone el empleo de funciones de pertenencia triangulares por su simplicidad y bajo costo computacional[5, 4], posteriormente se especificarán los bordes de cada función de pertenencia.

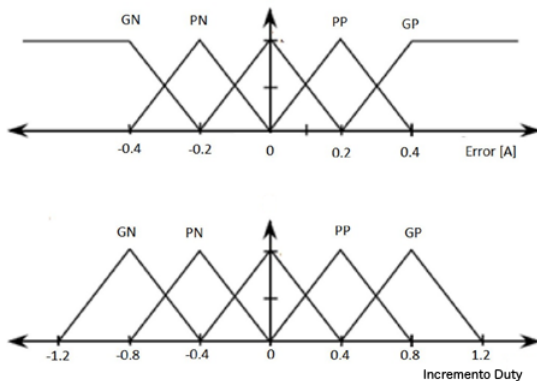


Figura 5: Funciones de pertenencia de entrada y salida.

De lo expuesto, la función de pertenencia en el universo de discurso esta dado por el pseudocódigo (3).

$$\begin{aligned}
 GN &= 1 (e \leq -0,4) - (5e + 1) (e > -0,4 \&\& e \leq -0,2) \\
 &\quad + 0 (e > -0,2) \\
 PN &= 0 (e \leq -0,4) + (5e + 2) (e > -0,4 \&\& e \leq -0,2) \\
 &\quad - (5e) (e > -0,2 \&\& e \leq 0) + 0 (e > 0) \\
 Z &= 0 (e \leq -0,2) + (5e + 1) (e > -0,2 \&\& e \leq 0) \\
 &\quad - (5e - 1) (e > 0 \&\& e \leq 0,2) + 0 (e > 0,2) \\
 PP &= 0 (e \leq 0) + (5e) (e > 0 \&\& e \leq 0,2) \\
 &\quad - (5e - 2) (e > 0,2 \&\& e \leq 0,4) + 0 (e > 0,4) \\
 GP &= 0 (e \leq 0,2) + (5e - 1) (e > 0,2 \&\& e \leq 0,4) \\
 &\quad + 1 (e > 0,4)
 \end{aligned} \tag{3}$$

III-B. Mecanismo de inferencia.

El mecanismo de inferencia tiene como objetivo utilizar las variables que han sido fusificadas para poder llegar por medio del conocimiento del diseñador del comportamiento del sistema balasto-lámpara a una conclusión o consecuencia, este mecanismo es muy parecido a la lógica formal.[5] Para expresar este conocimiento se utiliza una base de reglas a partir del análisis del comportamiento del sistema, la edición de estas determina la estrategia de control obtenida, ya sea por conocimientos generales del sistema, a partir de prueba y error o intuitivamente.

En base a los criterios del comportamiento del sistema obtenidos mediante experimentación al variar la tensión del bus de CD y observar la respuesta en la corriente en la lámpara, se definen la base de reglas conforme se presenta en la Tabla II.

Cuadro II: Base de reglas.

Error	GN	PN	Z	PP	GP
Ciclo de Trabajo	GP	PP	Z	PN	GN

III-C. Desfusificación.

La desfusificación es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero es en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia borrosa, esta genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real con el objetivo de ser empleado físicamente. Para poder llegar a esta representación se emplea la desfusificación por centro de gravedad.[5, 8] que corresponde a (4).

$$u_{cris} = \frac{\sum_{i=1}^r b_i * U_i}{\sum_{i=1}^r U_i} \tag{4}$$

Donde:

u_{cris}	Valor defusificado por centro de gravedad
b_i	Centro de la función de pertenencia del conjunto difuso
r	Número de reglas
$\sum_{i=1}^r U_i$	Sumatorio de las áreas de los conjuntos difusos

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se realiza la simulación del controlador Fuzzy mediante Matlab, para esto se empleó la herramienta simulink la cual permite construir un modelo del balasto electrónico que está conformado por el convertidor Buck-Boost y el inversor en configuración puente H. Para el caso del controlador se implementa mediante un bloque de simulink correspondiente a una función preprogramada de Matlab. En la Figura 6 se presenta el esquema desarrollado en simulink.

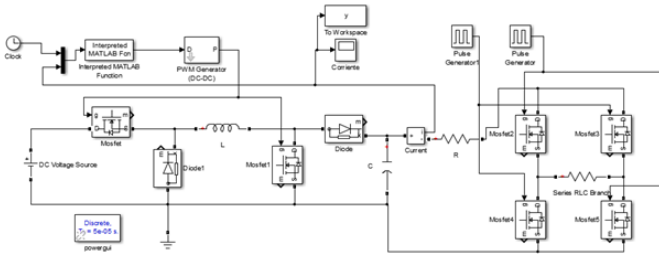


Figura 6: Balasto electrónico en simulink

Los valores empleados para la simulación fueron: la fuente de alimentación (tensión de entrada) de 160 VCD, el inductor de 1[mH] y el capacitor de 47[uf], para el caso del puente H se utiliza una resistencia de 250[ohm] que representa la lámpara HID-MH, ya que según la literatura a altas frecuencias el comportamiento de la impedancia equivalente de la lámpara se asemeja a un resistor. Como primer punto se simula al balasto electrónico sin control Fuzzy con un ciclo de trabajo constante del 50%.

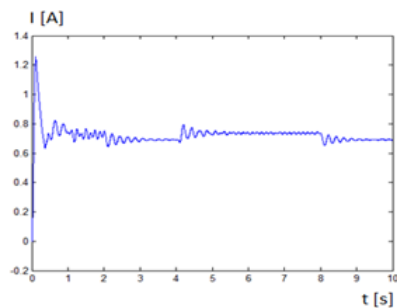


Figura 7: Corriente en el balasto electrónico sin control

Como se puede apreciar en la Figura 7 la corriente tiene una especie de respuesta subamortiguada cíclica ante un valor constante de ciclo de trabajo, generando una corriente fluctuante que provoca inconvenientes en la lámpara como parpadeo

y a largo tiempo daños en la ampollita o que la lámpara simplemente se apague o destruya. Es por eso que es necesario un controlador capaz de mantener una corriente constante. Una vez definido el controlador hay que tomar en cuenta que el mismo se activa después de 1 segundo, asegurando el paso por la etapa de ignición, con una condición inicial del ciclo de trabajo al 50 %, y que el set point de corriente está establecido en 1 [A].

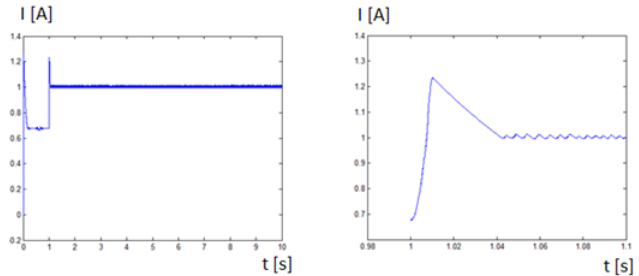


Figura 8: Corriente en el balasto electrónico con control

Como se puede observar en la Figura 8 la corriente se mantiene en un valor estable con un tiempo de establecimiento aproximado a los 40 ms y un sobre pico aproximado del 23%. Las pequeñas oscilaciones de la corriente presentes tienen su origen en la resolución del controlador difuso, es decir por el número de reglas empleado.

Se realiza la respuesta al escalón del conjunto balasto-lámpara el cual simula las perturbaciones que se dan en la red eléctrica para lograr esto se alimenta el balasto electrónico con una fuente de tensión variable Kepko KLP600 controlable via GPIB. Inicialmente la fuente tendrá una tensión de 169 VCD y se eleva y reduce la tensión en pasos de 10 Voltios para capturar las formas de onda de la tensión y corriente (esta última es tomada del sensor de corriente ACS712) se emplearon puntas diferenciales Pintek DP-25 con una atenuación de 200, para el caso de la tensión y para el caso de la corriente se lo hace con una atenuación de 20 que es la mínima que permite la punta. Las señales atenuadas de tensión y corriente son introducidas a una tarjeta de adquisición de datos PCI modelo Gage Octopus de 250Ms/s para su captura y análisis. Los resultados se presentan en las Figuras 9 y 10, donde se exponen las respuestas del sistema frente a variaciones de la tensión CD en ausencia y presencia del controlador respectivamente.

El balasto electrónico al ser sometido a perturbaciones de tensión, la corriente tiende a seguir dichas perturbaciones (Figura 9), es decir, que si la tensión de alimentación aumenta, la corriente también lo hace. Esto se debe a que el valor del ciclo de trabajo es fijo y no compensa dichas perturbaciones, permitiendo que la lámpara sufra cambios de potencia bruscos causando resonancias acústicas que se traducen en parpadeos de luz generados por la lámpara.

El sistema balasto-lámpara con el controlador activado, al ser sometido ante perturbaciones de tensión, la corriente se mantiene en el valor establecido de 1 [A](Figura 10). Esto se debe a que el valor del ciclo de trabajo ya no es fijo sino que este busca compensar las perturbaciones ya sea aumentando o

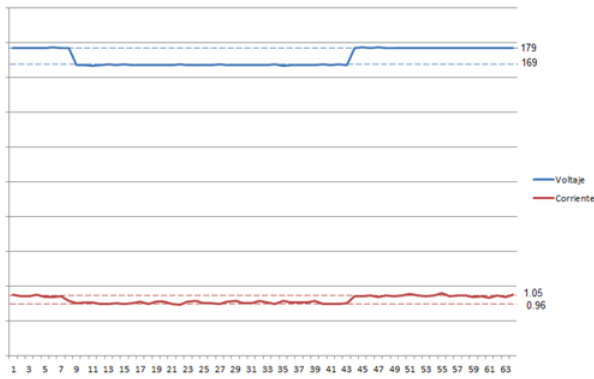


Figura 9: Respuesta al escalón del balasto electrónico sin control.

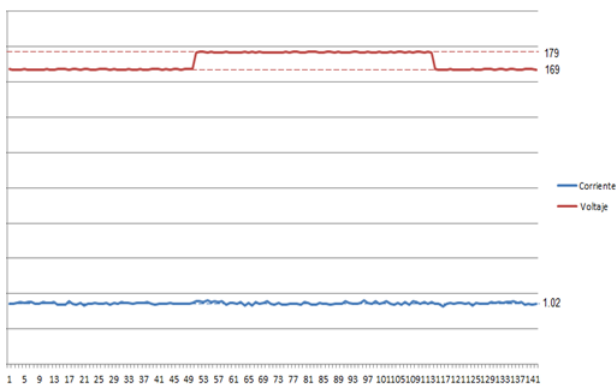


Figura 10: Respuesta al escalón del balasto electrónico con control.

reduciendo su valor.

IV-A. Implementación

El diseño de los circuitos electrónicos implementados se pueden resumir en tres secciones y cada una se construyó en una tarjeta electrónica diferente.

La primera etapa, se trata del inversor en puente completo que se divide en dos etapas, la parte de potencia que consiste en el puente H y se observa en la parte derecha, Figura 11 y la parte izquierda en donde se encuentra el driver IR2130 que es el encargado de realizar el disparo de los mosfet.

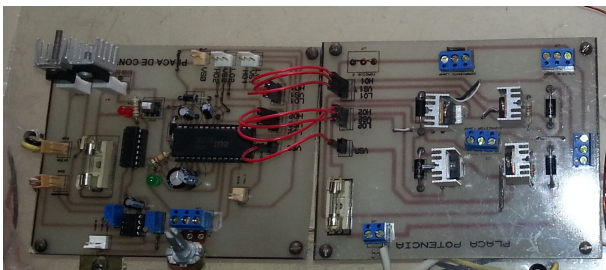


Figura 11: Inversor en puente completo implementado..

La segunda etapa, se trata del rectificador de onda completa y el convertidor Buck Boost que se divide en dos etapas

la parte de potencia que consiste en los dos convertidores mencionados y se encuentran en la parte izquierda conforme se presenta en Figura 11 y en la parte derecha se encuentran los drivers TLP250 que son los encargados de disparar a los mosfet del convertidor buck-boost.

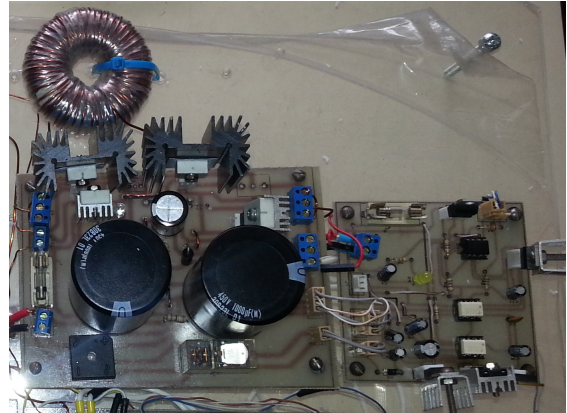


Figura 12: Buck-boost y rectificador de onda completa implementados.

La tercera etapa, se trata del controlador y las fuentes de alimentación para los drivers de las etapas anteriores, en esta etapa se encuentran dos microcontroladores 18f2550 el primero se encarga de generar la señal para el Inversor de puente completo y el segundo tiene la función del controlador difuso.



Figura 13: Controlador y fuentes implementados.

V. CONCLUSIONES

- La implementación de un balasto electrónico a través de la utilización de dos convertidores: un AC/DC y un DC/AC permite controlar el comportamiento dinámico de la lámpara HID-MH, lo que no es posible con el empleo de un balasto electromagnético.
- El balasto electrónico al estar constituido por dos convertidores requiere de la generación de dos señales. La señal proveniente del control Fuzzy será aplicada al convertidor Buck-Boost para controlar la corriente en la lámpara, mientras que al Puente H se entrega una señal fija en frecuencia.
- Al aplicar la señal de control al convertidor Buck-Boost se logró mantener la corriente en un valor establecido en 1 [A]. Para ello se decidió emplear un control Proporcional Fuzzy ya que este disminuía en gran medida los efectos de las perturbaciones en la corriente de la lámpara lo que se traduce en resonancia acústica acosta de tener un error en estado estable del 2% el cual es aceptable.

- La identificación y cuantificación de las reglas difusas que tienen correspondencia con la dinámica de la planta física han sido esenciales en la generación de un algoritmo de control apropiado.
- El controlador actúa de manera totalmente predecible y además es posible conocer el estado del sistema en cualquier momento, esto se debe a las definiciones utilizadas en las bases de conocimiento y en las funciones de pertenencia.
- El controlador difuso implementado ha sido una alternativa robusta y flexible de control para el conjunto balasto-lámpara ya que esta permite una fácil adaptación a nuevos problemas dentro del funcionamiento normal del sistema, ahorrando tiempo de desarrollo del mismo.

REFERENCIAS

- [1] Eumir Deidier Enríquez Douriet. Caracterización de lámparas de alta intensidad de descarga alimentadas con formas de onda cuadradas. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET, 2005.
- [2] Javier Correa Gómez. Estrategias de control en Lámparas de alta presión para la eliminación de resonancias acústicas. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET, 2004.
- [3] Rosendo Flores Hernández. Modelado dinámico de Lámparas de alta intensidad de descarga. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET, 2007.
- [4] Ahmad M. Ibrahim. *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*. 2004.
- [5] Stephen Yurkovich Kevin M. Passino. *Fuzzy Control*. ADDISON-WESLEY, 1998.
- [6] Juan Anttonio Aquí Tapia. Balastro electrónico para lámparas de alta intensidad de descarga alimentadas con formas de ondas cuasi-cuadradas. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET, 2011.
- [7] COHEN S. KEEFE W. ZASLAVSKY, G. Improved starting of the 100-w metal halide lamp. *IES*, (4):76–83, 1990.
- [8] Stjepan B. Zdenko K. *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*. 2005.



Giovanni Fernando Regalado Basantes Estudiante Egresado de Ingeniería Electrónica Automatización y Control de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) en 2013. Nació en Quito, Ecuador, el 29 de Enero de 1988. Se graduó en el "Colegio Militar Abdón Calderón" de Bachiller Técnico en Informática. Su campo de interés son la automatización de procesos y la investigación de nuevos elementos que ayuden a mejorar y facilitar la vida cotidiana.



Nestor David Villacís Diaz Estudiante Egresado de Ingeniería Electrónica Automatización y Control de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) en 2013. Nació en Quito, Ecuador el 10 de octubre de 1990. Su educación primaria y secundaria lo realizó en la Institución "Liceo Naval Quito". Su campo de interés son los sistemas automáticos en procesos industriales, así como el área de instrumentación y control industrial.



Jaime Paúl Ayala Taco Ingeniero Electrónico graduado en la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) en 1997, obtuvo su MBA en la ESPE en 2000 y su maestría en Mecatrónica en la Universidad Politécnica de Cataluña-España en 2004. Actualmente es candidato a Doctor en Ciencias en Automática y Controles por la CUJAE-Cuba. Su campo de investigación se encuentra en los accionamientos estáticos y control avanzado e inteligente en aplicaciones de electrónica de potencia.



Victor Proaño Ingeniero en Electrónica y Control graduado en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en 1985, obtuvo su maestría en ciencias de Ingeniería en Electrónica en la ESPE en el año 2008. Actualmente es profesor de la asignatura Control Inteligente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sus áreas de interés son la Electrónica de Potencia y la Inteligencia Artificial.