

# Control Adaptativo por el Método de Gain Scheduling aplicado a una Lámpara HID-MH de 250W

Carolina Barrionuevo, William Chicaiza, Rodolfo Gordillo, Paul Ayala, ESPE

**Resumen**—El presente artículo está dedicado al control de una lámpara de halogenuros metálicos, donde se utiliza la técnica de control adaptativo por *Gain Scheduling*, la cuál solo se debe aplicar una vez se conozca el comportamiento de la planta en los diferentes puntos de operación, el sistema a ser controlado es un balastro electrónico que consta de cinco etapas las cuales se dividen en: etapa de encendido de placas, etapa de amplificación, rectificación y filtrado DC de las señales, etapa de control adaptativo, etapa de control de mosfet, etapa de potencia y etapa de sensamiento.

## I. INTRODUCCIÓN

Las lámparas de halogenuros metálicos siempre han sido consideradas difíciles de modelar y aún más de controlar ya que poseen características de inestabilidad muy marcadas, su trabajo depende de las condiciones del medio a la cuál se encuentran sometidas, que van desde la temperatura del ambiente hasta la posición en que se encuentran colocadas, uno de los factores más influyentes en su comportamiento es la frecuencia de trabajo ya que por medio de ésta se puede garantizar que la lámpara entre o no en resonancia. [3]

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 puede apreciar en la figura 1.

La ampolla contiene al tubo de descarga. En los extremos del tubo de descarga se ubican los electrodos. El interior del tubo de descarga contiene el gas de relleno a alta presión (0.98 bar). También, en un extremo de la ampolla se encuentra el casquillo por donde se conecta la lámpara a la fuente de energía eléctrica.[8]

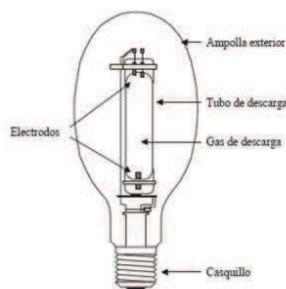


Figura 1: Estructura general de la lámpara HID

Las lámparas HID se caracterizan por ser económicas y por su capacidad para producir luz extremadamente brillante, con dimensiones pequeñas. La luz se genera directamente mediante

una descarga de arco eléctrico. La descarga eléctrica continua entre los dos electrodos de la lámpara hace que brille el gas con la descarga. Durante el encendido de estas lámparas se produce un efecto conocido como impedancia negativa que hace que la corriente se dispare de forma infinita por lo que, el encendido de estas lámparas solo es posible mediante la utilización de balastos magnéticos y electrónicos que ayuden a garantizar el correcto funcionamiento de esta.[5]

En base a lo expuesto anteriormente, se desarrolló un sistema para el encendido de estas lámparas cuyo diagrama esquemático se puede apreciar en la figura 2.

Este sistema funciona de la siguiente manera, para la activación de la lámpara se utilizó un interruptor on-off el cual alimenta todo el circuito, la etapa de control adaptativo genera la señal de entrada a la placa de control de mosfet el cual se destaca por la utilización del Driver IR2130 que es el que activa los mosfet IRF740 en distribución de puente H encontrados en la placa de potencia, donde se genera la onda cuadrada para la activación de la lámpara HID, el balastro realiza sensamiento de voltajes y corrientes de la lámpara, a fin de determinar si ésta se encuentra en una frecuencia que garantice valores nominales en potencia, para lo cual se utilizó el sensor de corriente CST206, si no se llega a cumplir esta condición, el sistema modificará sus parámetros hasta encontrar los adecuados para su correcto desempeño.

La etapa de potencia es la única que no se activa al instante de encender el sistema, ésta espera 5 segundos antes de la activación del relé para su encendido, si después de tres intentos de encendido la lámpara no empieza a iluminar se desplegará un mensaje de reemplazo de lámpara.

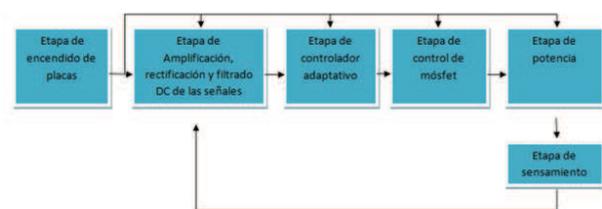


Figura 2: Diagrama Esquemático del balastro electrónico

## II. MODELADO

Para obtener un modelo adecuado de la planta se realizó un proceso de identificación el cual consistió en la toma de datos de voltajes, corrientes e impedancias, en rangos de frecuencias

de 10 a 100 kHz, obteniendo como resultado, un comportamiento estable de 20 a 30 kHz.

Para una mejor identificación se procedió a realizar este proceso cuatro veces, consiguiendo corroborar en cada toma el mismo comportamiento.

Una vez obtenidos los datos, se procedió a cargar aquellos valores dentro del rango mas estable en la herramienta IDENT de MATLAB, en donde después de manipular polos y ceros se logró encontrar una planta de primer orden con características muy estables.

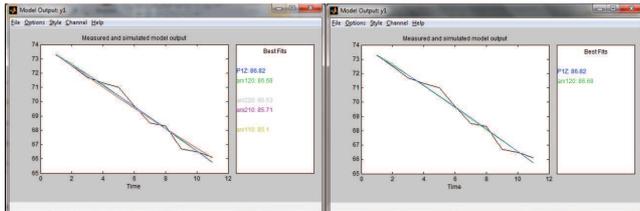


Figure 3: Gráfica de ajuste de las funciones de transferencia obtenidas

#### II-0a. Modelo de la plata:

$$G(S) = \frac{as + b}{cs + d} \quad (1)$$

Para identificar con exactitud el punto de operación en el cuál se está trabajando se procede a realizar gráficas de magnitud y fase con lo cual se obtuvo el siguiente resultado.

#### II-A. Margen de fase y Magnitud

Puesto que los datos de la lámpara se los tomó cuando la misma se encontraba ya estabilizada se requiere comprobar que la zona en la cual se esta trabajando corresponde efectivamente al punto de estabilización del sistema.

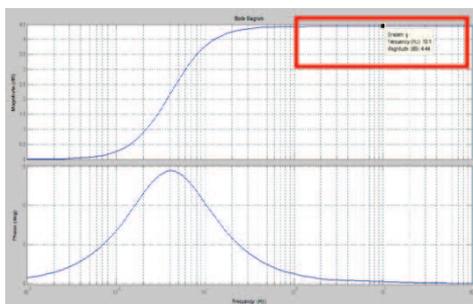


Figure 4: Trabajo en estado estable

Al colocar como referencia una frecuencia de 10kHz se puede apreciar que los valores de impedancia obtenidos del comportamiento de la planta pertenecen a la constante K presente en el modelo, donde el controlador al observar una variación en la impedancia busca compensarla al cambiar la constante del sistema.

### III. CONTROL ADAPTATIVO

El método de control a ser utilizado es el *Gain Scheduling*. Este método posee la característica de realizar control en base a una tabla de datos previamente establecidos, por lo que no se requiere hacer una identificación continua de las características del sistema en el transcurso del tiempo para controlarlo, sino que ya se conoce con anterioridad el comportamiento que va a tener la planta bajo cualquier tipo de circunstancias. En el caso de la lámpara HID este tipo de control adaptativo se adecúa perfectamente a las características del sistema ya que, muchos de los métodos de control adaptativo están diseñados para un tipo de control en base a su evolución en el tiempo, en el caso de la lámpara HID no se la puede por el momento trabajar en base a su evolución en el tiempo ya que esta requiere un lapso de estabilización previa antes de un cambio de estado, si se realiza cambios de frecuencias demasiado bruscos se puede producir efectos de resonancia, por lo que se necesita realizar su control en un estado estacionario lo que dificulta escoger cualquier tipo de control clásico. Al utilizar este método de control adaptativo no solo se garantiza un comportamiento adecuado de la lámpara HID sino que también se reducen procesos innecesarios en el controlador haciendo que se pueda realizar el control con un simple microcontrolador como el PIC16F877A.[5], [6], [7], [9]

Los resultados obtenidos en las tres primeras tomas de datos permitieron evidenciar que en el rango de 20 a 30 kHz el plasma de la lámpara tiene un comportamiento muy estable así como también se registraron los valores más bajos de impedancia y los valores más altos de potencia

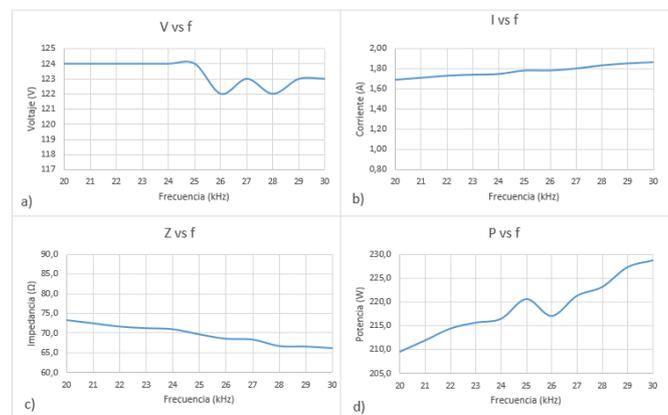


Figure 5: a)voltaje, b)corriente, c)impedancia, d)potencia de la lámpara HID-MH obtenida desde 20 kHz a 30 kHz

#### III-A. Lazo de Control

El lazo de control se encuentra representado por la figura 6 donde el set point o referencia esta dado por la impedancia a la que se quiere mantener el sistema para garantizar máxima potencia en la lámpara, a medida que se produce una perturbación en la impedancia ya sea por envejecimiento de la lámpara o por efectos del ambiente, la frecuencia se adapta de manera que encuentre una impedancia adecuada para dar seguimiento a la referencia ya que a medida que aumenta la

frecuencia aumenta la impedancia y viceversa, consiguiendo de esta forma un comportamiento adecuado de la lámpara.

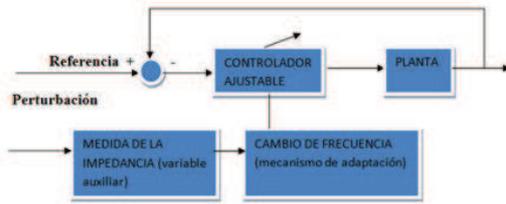


Figura 6: Lazo de Control [10]

III-B. Tabla de Gain Scheduling

En ésta tabla constan los valores de impedancia que se requiere garantizar para que el controlador mantenga la lámpara funcionando dentro del rango deseado consiguiendo siempre su potencia nominal, consta de una variable auxiliar que es el valor de la impedancia real de la lámpara monitoreada gracias a los sensores de voltaje y corriente. El punto de operación es el set point del controlador, el cuál será modificado a convenir cada vez que haya un cambio en el trabajo habitual de la lámpara para garantizar que la impedancia aumente conforme aumenta la frecuencia.[10], [2], [1], [4]

FRECUENCIA (kHz)	Punto de Operación (P.O.)	Variable Auxiliar (Z <sub>aux</sub> )
20	63Ω : 65Ω	63 Ω
21	63Ω : 65Ω	63.2 Ω
22	63Ω : 65Ω	63.4 Ω
23	63Ω : 65Ω	63.6 Ω
24	63Ω : 65Ω	63.8 Ω
25	63Ω : 65Ω	63.9 Ω
26	63Ω : 65Ω	64 Ω
27	63Ω : 65Ω	64.2 Ω
28	63Ω : 65Ω	64.6 Ω
29	63Ω : 65Ω	64.8 Ω
30	63Ω : 65Ω	65 Ω

Figura 7: Tabla Gain Scheduling

III-C. Diagrama de Flujo del Controlador

El diagrama de flujo se presenta en la figura 8.

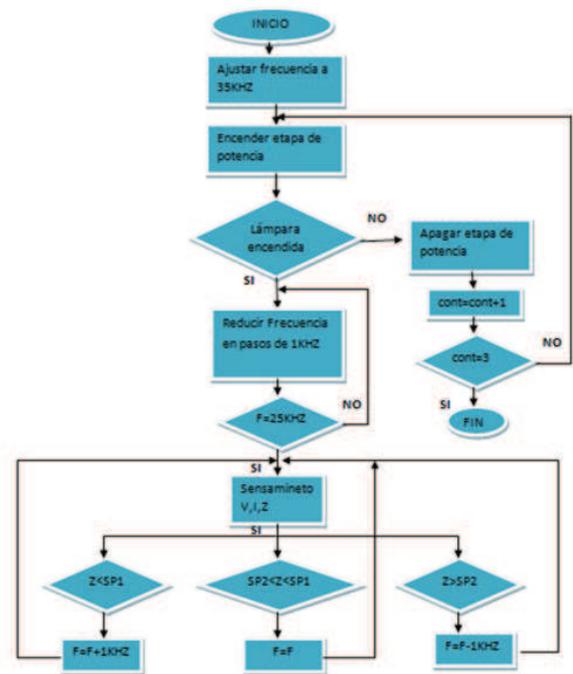


Figura 8: Diagrama de flujo del controlador

El encendido de la lámpara se encuentra fuera del rango de trabajo debido a los altos picos de corriente que se producen al encenderla por lo que se requiere iniciarlo a una frecuencia alta para disminuir la corriente y de esta forma evitar problemas de gravedad en el hardware.

Una vez encendida la lámpara se procede a disminuir la frecuencia en pasos de 1kHz hasta llegar al rango establecido, donde los 25kHz son el punto medio de la frecuencia de trabajo. Una vez estabilizada la lámpara se procederá a iniciar el control de impedancias y garantizar la potencia nominal del sistema.

IV. RESULTADOS

Mediante la implementación del controlador se pudo conseguir que la frecuencia de trabajo del balastro varíe en función del valor de la impedancia establecida como set point (63 - 65 ohms) de forma que se pueda conseguir la máxima potencia de la lámpara en el rango de 20 a 30 kHz así como también para mantener al sistema en un estado estable, evitando a la vez cambios bruscos de voltaje, corriente y potencia, lo que garantiza el correcto funcionamiento de la lámpara HID.

Para comprobar que el controlador se encuentra realizando correctamente su trabajo se procedió a tomar los datos con una tarjeta GAGE OCTOPUS de 250 Megasampling/segundo el mismo que mostró el comportamiento de la lámpara mientras se estabilizaba (sin control) hasta que empezaba a controlar en 23kHz, 25kHz y 27kHz y con ello se pudo verificar que durante la estabilización la impedancia de la lámpara tenía valores distintos al del set point mientras que durante el control la impedancia se encontraba en el rango del set point y la potencia estaba en su valor nominal manteniéndose constante como se puede apreciar en la figura 9. Se puede comprobar

que el controlador mantiene la impedancia dentro de un rango establecido y que su potencia es completamente constante.

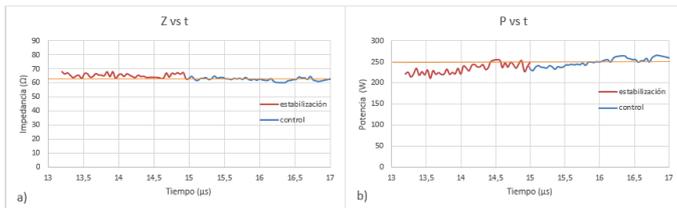


Figura 9: Comportamiento de a) la impedancia y b) la potencia de la lámpara a 23 kHz

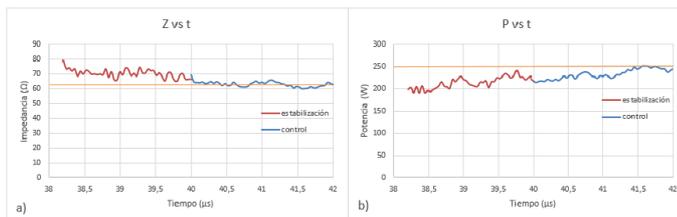


Figura 10: Comportamiento de a) la impedancia y b) la potencia de la lámpara a 25 kHz

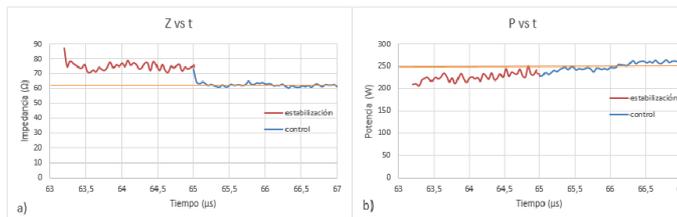


Figura 11: Comportamiento de a) la impedancia y b) la potencia de la lámpara a 27 kHz

## V. CONCLUSIONES

- Ya que el *Gain scheduling* se caracteriza por controlar el sistema en función de tablas, en donde el comportamiento de la planta es previamente definido, evitando que la identificación sea un proceso cíclico se puede garantizar con su utilización el ahorro de procesos en el microcontrolador.
- Debido al comportamiento de la lámpara, en especial considerando que esta requiere un tiempo mínimo de 6 minutos de estabilización antes de cambios bruscos de frecuencia, no se puede hacer una medición o toma de datos en tiempo dinámico, por lo que se optó por la toma de datos en estado estable para determinar el comportamiento de la misma en base a información de voltaje, corriente, potencia, impedancia y frecuencia, bajo estas circunstancias el control más adecuado en base a datos obtenido es el *Gain Scheduling*.
- La lámpara HID sin el controlador posee la propiedad de aumentar su corriente a medida que aumenta la frecuencia, lo que se logró controlar al compensar voltajes y corrientes a medida que varía la frecuencia, consiguiendo

que la impedancia al colocar el controlador aumente conforme aumenta la frecuencia con lo que se garantiza un comportamiento estable tanto en impedancia como potencia.

- Debido a que existe un aumento de impedancia a medida que aumenta la frecuencia, se pudo observar durante las pruebas que la intensidad luminosa también actúa en función de estos parámetros por lo que se puede concluir que la dimerización es algo posible para este tipo de lámparas.

## REFERENCIAS

- [1] Arkadiusz J Antonczak and Krzysztof M Abramski. Phase locked loops for laser coherent systems. In *Transparent Optical Networks, 2000 2nd International Conference on*, pages 229–232. IEEE, 2000.
- [2] Karl Johan Astrom and Bjorn Wittenmark. *Adaptive control*. Dover Publications, 2008.
- [3] 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.
- [4] Luís García. *sistemas de control avanzado*. Politécnica de Colombia JIC, 2010.
- [5] 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.
- [6] Juan Fernando Guamán Novillo, Ana Verónica y Vásquez Rodríguez. Diseño e implementación de un prototipo de un sistema de control adaptativo para una planta de temperatura. 2006.
- [7] R GUTIERREZ. *MODELOS Y MODELIZACIÓN*.
- [8] Rosendo Flores Hernández. Modelado dinámico de Lámparas de alta intensidad de descarga. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET, 2007.
- [9] Manuel Jesús López Rubio, Francisco Rodríguez Sánchez. *Control adaptativo y robusto*, volume 9. Universidad de Sevilla, 1996.
- [10] Rodríguez y Bordón. *Apuntes de ingeniería electrónica*.



**Carolina Barrionuevo** Estudiante Egresada de Ingeniería Electrónica Automatización y Control de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) en 2012. Nació en Quito, Ecuador el 26 de mayo de 1988. Su educación primaria lo realizó en la Escuela "Interoceánico School", su educación secundaria la realizó en el Colegio Experimental "24 de Mayo". Su campo de interés son la automatización de procesos y la investigación de nuevos elementos que ayuden a mejorar y facilitar la vida cotidiana .



**William Chicaiza Guanotasig** Estudiante Egresado de Ingeniería Electrónica Automatización y Control de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) en 2012. Nació en Quito, Ecuador el 13 de marzo de 1986. Su educación primaria lo realizó en la Escuela "República de Alemania", su educación secundaria la realizó en el Colegio Nacional Experimental "Juan Pío Montúfar". 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.

**Rodolfo Gordillo Orquera** Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones graduado en la Escuela Politécnica del Ejército en el año de 1996. Obtuvo su Masterado en Ingeniería Electrónica el año 2008 en la misma institución. Actualmente se desempeña como profesor a tiempo completo en el Departamento de Eléctrica y Electrónica en la ESPE- Ecuador. Adicionalmente es Coordinador de Investigación de su Departamento y profesor tiempo completo en el Área de Automática y Robótica. Sus intereses investigativos radican en las redes de comunicación industriales, comunicaciones inalámbricas y los sistemas de control avanzados .