

# ***Estabilización en alta frecuencia de lámparas de descarga de alta intensidad. Propuesta de un balasto electrónico para operación libre de resonancias acústicas.***

Dr. Alexander Fernández Correa<sup>1</sup>, Dra. Susset Guerra Jiménez<sup>2</sup>, Jaime Paul Ayala Taco<sup>3</sup>, Yandry Rodríguez Domínguez<sup>4</sup>

## **Resumen**

El presente trabajo presenta un estudio sobre alternativas para la estabilización de lámparas de descarga de alta intensidad de Halogenuros Metálicos destacando la operación en alta frecuencia por sus ventajas a pesar de la presencia del fenómeno de la resonancia acústica. Se abordan también los métodos para la detección y eliminación de la resonancia acústica. Partiendo del estudio realizado se propone finalmente un balasto electrónico genérico y se detallan todas las partes que debe contener el mismo. Se realiza a nivel de simulación un prototipo para la aplicación específica de una lámpara de Haluros Metálicos (HM) de 150 W, mostrándose dichos resultados y los pasos para realizar el control utilizando el método de detección de resonancia acústica por cambios en la impedancia y su eliminación por corrimiento de frecuencias hacia zonas libres de resonancia acústica.

En algunos trabajos científicos se han abordado métodos orientados a

resolver el problema de la resonancia acústica en lámparas HID operando a altas frecuencias, sin embargo las soluciones planteadas se han limitado a lámparas de un fabricante y de cierta potencia, lo que no se constituyen en una salida definitiva. El estudio de éstas soluciones parciales permite poner en perspectiva la problemática que la operación en alta frecuencia trae, sin perder de vista la enorme ventaja respecto del control sobre los parámetros propios de la lámpara, como el incremento del tiempo de vida y la calidad en la iluminación, que éste tipo de operación tiene. Es entonces que los trabajos en éste sentido se encuentran orientados a encontrar un modelo que permita realizar un control óptimo, mediante la implementación de un balasto electrónico, de la operación de la lámpara HID de Halogenuros Metálicos.

## **Introducción**

En la actualidad alrededor del 25% del consumo de energía eléctrica a nivel mundial se utiliza para la iluminación artificial, tanto de espacios interiores

como de exteriores. Diversos tipos de fuentes luminosas son utilizadas con este propósito y entre ellas se destacan las lámparas de descarga de alta intensidad HID por sus siglas en inglés y dentro de ellos especialmente las lámparas de halogenuros metálicos por su elevada eficacia luminosa, alto índice de reproducción de colores, elevada temperatura de color y elevado tiempo de vida entre otras características que las hacen actualmente una de las fuentes luminosas más eficientes y que más se pueden adaptar a diversos requerimientos de iluminación. Sin embargo, tradicionalmente este tipo de lámpara ha sido operada mediante estabilización a través de un balasto electromagnético que aunque son dispositivos relativamente baratos y robustos, son voluminosos, pesados y poseen una característica de estabilización que imposibilita el control de la potencia de la lámpara entre ciertos límites que varían en función de las fluctuaciones de tensión de la red y el envejecimiento de la lámpara.

El empleo de balastos electrónicos para la estabilización en alta frecuencia de las lámparas de halogenuros metálicos, además de las ventajas intrínsecas a este tipo de lámparas como la obtención de elevados niveles de

luminosidad y una reproducción eficiente del color, permitiría otras adicionales como son: la reducción en el tamaño del controlador (balastro) debido a la disminución del tamaño de sus componentes, alta eficiencia en el control de la lámpara por el lazo cerrado que se puede implementar, la posibilidad de realizar un control a distancia, la alimentación a potencia constante frente a variaciones de la tensión de la red eléctrica y frente a los cambios de parámetros que ocurren durante toda la vida útil de la lámpara aspecto este que posibilitaría aumentar el tiempo de vida medio de la lámpara, así como también el posible control "dimming" que permitiría sintonizar a los balastos para operar las lámparas con niveles de iluminación y consecuentemente de consumo de energía eléctrica variables en función de los requerimientos de iluminación.

Sin embargo, la operación a altas frecuencias puede presentar en la lámpara un fenómeno conocido como resonancia acústica, que se puede explicar como la coincidencia de la frecuencia de operación de la lámpara, o alguno de sus principales armónicos, con alguna de las frecuencias propias de la lámpara, siendo su efecto la variación de la presión al interior del tubo de descarga. Estas frecuencias

propias (frecuencia de resonancia del sistema físico de la lámpara) son función principalmente de la construcción de la lámpara, es decir dependen de variables como la presión del gas al interior del tubo de descarga, la temperatura, la geometría del tubo y la mezcla gaseosa en su interior, entre otros aspectos.

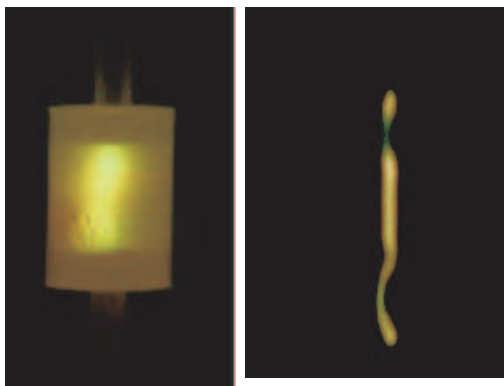


Fig.1. Resonancias acústicas

El efecto en la lámpara HID-MH de la resonancia acústica se traduce en "flicker", es decir un parpadeo del arco eléctrico que produce la iluminación con una posibilidad de extinción del arco y en el peor de los casos este parpadeo puede llegar a tocar las paredes internas del tubo de descarga (el arco se encuentra a varios cientos de grados de temperatura) ocasionando la destrucción de la lámpara.

Varios trabajos de investigación se han orientado a proponer soluciones tendientes a eliminar o por lo menos disminuir el fenómeno de la resonancia

acústica en lámparas HID-HM de baja potencia operando a altas frecuencias, lo que posibilitaría su empleo masivo y económico en aplicaciones domésticas con la consecuente disminución en el consumo eléctrico y optimización energética.

## Resultados y Discusiones

Topologías de circuitos para balastos electrónicos basados en metodologías de control han sido propuestas en lámparas HID-MH, dentro de éstas se establecen tres tipos: (i) Balastro tipo DC, (ii) Balastro sintonizado a alta frecuencia y (iii) Balastro operando a muy alta frecuencia [1].

El primer método no es utilizado en la práctica una vez que la operación con corriente directa produce en la lámpara un fenómeno llamado cataforesis, que no es más que la migración de los componentes metálicos hacia uno de los electrodos, lo cual es totalmente perjudicial para la misma. El tercer método, si bien no tiene que lidiar con el fenómeno de resonancia acústica, requiere un diseño muy cuidadoso y esto implica el encarecimiento del balastro debido a la selección de los semiconductores ya que a frecuencias tan elevadas las pérdidas de conmutación se hacen preponderantes respecto a las de conducción. El segundo método no tiene las

desventajas de los métodos anteriores, pero como se ha dicho, puede aparecer el fenómeno de la resonancia acústica, lo cual implicará establecer métodos de control para su detección y eliminación. Una de las alternativas propuestas en la literatura [2] para implementar la operación en alta frecuencia es realizar modulación en frecuencia para distribuir el espectro de potencia de la lámpara, limitándolo fuera de la ventana de inestabilidad, entre 40 y 60 KHz. En esencia, se emplea una señal sinusoidal de baja frecuencia para modular una señal de alta frecuencia que es la alimentación de la lámpara. La descripción básica de una señal modulada es:

$$U_{FM} = U_C \cos(\omega_c t + mf \sin(\Omega t)) \quad (1)$$

Donde  $\omega_c t$  es el ángulo de la señal de alta frecuencia,  $\Omega t$  es el ángulo de la señal sinusoidal de baja frecuencia,  $mf$  es el índice de modulación.

El índice de modulación es importante en éste método, ya que permite cambiar la frecuencia propia de la potencia que se esta inyectando a la lámpara, lo que a su vez establece la operación libre de resonancia acústica al no coincidir o acercarse a la frecuencia propia de la lámpara. En base a éste estudio se determinó que si éste índice es muy pequeño el ancho del espectro de frecuencias de potencia no es lo

suficientemente grande como para eliminar completamente las resonancias acústicas. Por otro lado, si el índice es demasiado grande en el circuito resonante se presenta una corriente considerable a una baja frecuencia lo que ocasiona inestabilidad en el arco en el tubo de descarga de la lámpara. Esto indica que la frecuencia senoidal moduladora está limitada a unos pocos cientos de Hz.

Utilizando esta técnica en lámparas HID-MH de 250 W se han reportado los siguientes resultados:

1. Ausencia de resonancia acústica con una frecuencia central de operación de 47 KHz.
2. Voltaje de ignición de la lámpara sobre 1 KV.
3. Potencia de la lámpara en estado estacionario de 250 W.
4. Corriente de arranque menor a 10 A.
5. Empleo de una topología de inversor de medio puente alimentado con un bus de DC de 400 VDC, siendo la frecuencia central de operación fijada en 52 KHz, manteniéndose constante inclusive en el arranque.

Para las pruebas se emplearon tres lámparas del fabricante Osram y dos de Philips.

Se puede concluir parcialmente que de manera experimental se demostró que

si la potencia de la lámpara es superior a 280 W, las resonancias acústicas están presentes. Los experimentos del método en lámparas de 175 W trabajando a una frecuencia central de 50 Khz. y para lámparas de 400 W en 40 Khz. permitieron estabilidad en el arco, pero para lámparas bajo los 175 W éste método no permite la estabilidad en la lámpara debido a que la forma física de la lámpara cambia y en consecuencia las frecuencias propias son diferentes a las estudiadas, con lo que se puede concluir que al cambiar la potencia de la lámpara y consecuentemente su geometría, cambian completamente las ventanas libres de resonancia acústica.

Otra alternativa de la operación en alta frecuencia [3], [4] plantea la operación de la lámpara en una ventana de frecuencias libre de resonancia acústica, la cual se obtiene de forma experimental. Las bandas de resonancia difieren de una lámpara a otra, sin embargo es posible encontrar una ventana de frecuencias libres de éste fenómeno para cada lámpara, considerando que ésta ventana no es constante ni igual en lámparas de la misma familia, fabricante o potencia. El sistema implementado inicia la operación de la lámpara en alguna de las ventanas libres identificadas y a continuación calcula en intervalos de 30 segundos aproximadamente la

impedancia actual de la lámpara y la compara con una tabla que describe el comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia haciéndose notar que la ocurrencia de resonancia está acompañada de una reducción significativa de la impedancia de la lámpara.

En otro esquema muy difundido, desde el punto de vista práctico, para eliminar las resonancias acústicas se plantea disminuir el nivel de amplitud de los armónicos de potencia bajo un cierto nivel de umbral que se encuentra relacionado directamente con la energía de activación de la resonancia en la lámpara. Se presenta un prototipo de balastro electrónico [8] basado en una estrategia de control de la corriente que se entrega a la lámpara. En el estudio se consideró que en el proceso de envejecimiento de la lámpara la resistencia equivalente de la misma varía, por otro lado a bajas frecuencias (como la de la red eléctrica (50-60 Hz) el equivalente resistivo de la lámpara es no lineal en contraposición al funcionamiento a altas frecuencias donde su equivalente es lineal. En la literatura técnica es bien conocido que la resonancia acústica es un fenómeno producido por la generación de ondas de presión al interior del tubo de descarga [9], estas ondas producen armónicos de potencia cuya amplitud es una variable que produce la resonancia

acústica; para evitar este fenómeno se requiere que la amplitud de todos éstos armónicos se encuentren por debajo del nivel de umbral de la lámpara [8]. Experimentalmente se escogió en el estudio analizado una lámpara de haluros metálicos de 70 W. Siendo su nivel de umbral del 10% de su potencia nominal.

La topología empleada es de un inversor de alta frecuencia que entrega una onda quasi-cuadrada basada en un inversor Buck. El modo de control seleccionado es por corriente, siendo los parámetros empleados para el efecto la corriente máxima a través del switch ( $I_{MAX}$ ), y el tiempo de apagado

amplitud de los armónicos de potencia [8]. De ésta manera se diseña un balastro que tiende a mantener las amplitudes de los niveles de los armónicos de potencia por debajo del nivel de umbral de la lámpara, para de ésta manera eliminar la posibilidad de existencia de resonancia acústica.

El sistema de control propuesto se basa en la variación de algunos parámetros del inversor de alta frecuencia, con el propósito de mantener disponible la potencia entregada en su nivel nominal y la amplitud de los armónicos de potencia por debajo del nivel de umbral a pesar del envejecimiento de la lámpara, esto se basa en el hecho de que el mínimo de ( $\Delta P$ ) se obtiene si el

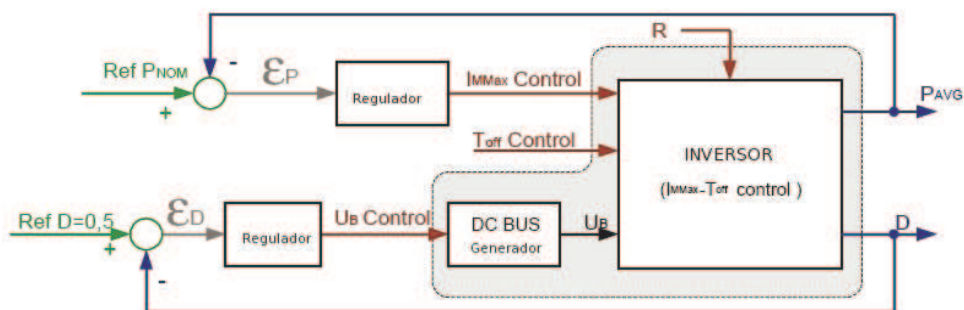


Fig. 2. Sistema de control propuesto en el estudio con dos lazos de control.

de este switch ( $T_{OFF}$ ). Este tipo de control ya ha sido empleado en aplicaciones de iluminación por control electrónico [10]. En este trabajo se encontró que la variación de potencia instantánea en la lámpara ( $\Delta P$ ) está relacionada directamente con la

inversor opera al 50% como ciclo de trabajo [8]. En consecuencia, la estrategia fue mantener al ciclo de trabajo lo más cercano posible al 50%. Al basarse en la topología de un inversor Buck, la relación entre la tensión de entrada ( $U_B$ ) y la tensión de

salida ( $V_O$ ) es función del ciclo de trabajo ( $D$ ). En consecuencia, la única manera de obtener control sobre el ciclo de trabajo es controlando la tensión de entrada, puesto que la tensión de salida depende de la potencia entregada a la lámpara y de su equivalente resistivo en ese instante. En cuanto a la potencia entregada a la lámpara, de estudios

del generador de DC. Existe un segundo lazo de control cuyo objetivo es mantener constante la potencia en su valor nominal al comparar la potencia entregada a la lámpara con su respectivo “set-point”. Sin embargo esta solución con dos lazos de control produjeron problemas en la dinámica de la lámpara por lo que se mejoró el

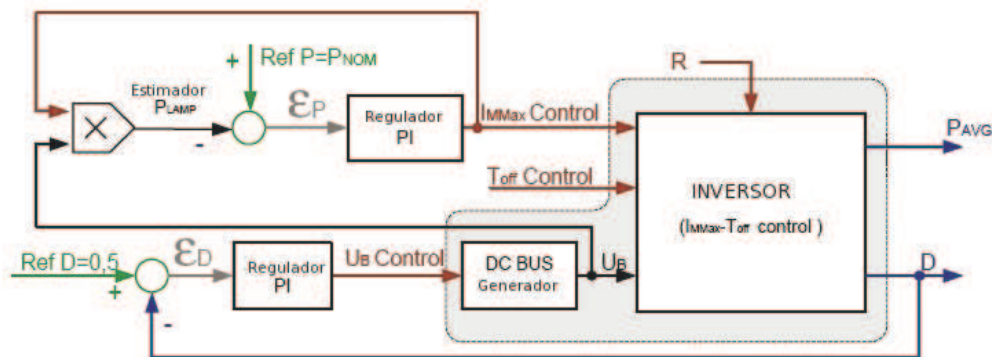


Fig. 3. Sistema de control propuesto en el estudio con estimador

teóricos [10] se precisa que la variación principal de sus parámetros depende mayormente de  $I_{MMAX}$ . También se estableció en el mismo estudio, que variaciones de  $T_{OFF}$  no afectan de una manera apreciable las características de la potencia entregada a la lámpara. En consecuencia se evidencia que la potencia puede ser controlada cambiando  $I_{MMAX}$  y  $T_{OFF}$  puede mantenerse constante. En la solución propuesta se mide el valor del ciclo de trabajo y se lo compara con un “set-point” del 50%, generándose una señal de error ( $E_D$ ) que es la señal de control

diseño al introducir un estimador de la potencia a partir de la tensión en el bus de DC.

El estimador se basa en el hecho de que si  $D$  tiende a ser del 50% y ( $\Delta P$ ) es bajo (menor al 10%) se puede observar que la potencia entregada a la lámpara es proporcional al producto de  $I_{MMAX}$  y  $U_B$  como se muestra en la ecuación.

$$P_{AVG} = K \cdot I_{MMAX} \cdot U_B \quad (2)$$

Donde  $P_{AVG}$  es la potencia entregada a la lámpara y  $K$  es una constante. De ésta manera se pretende mejorar el

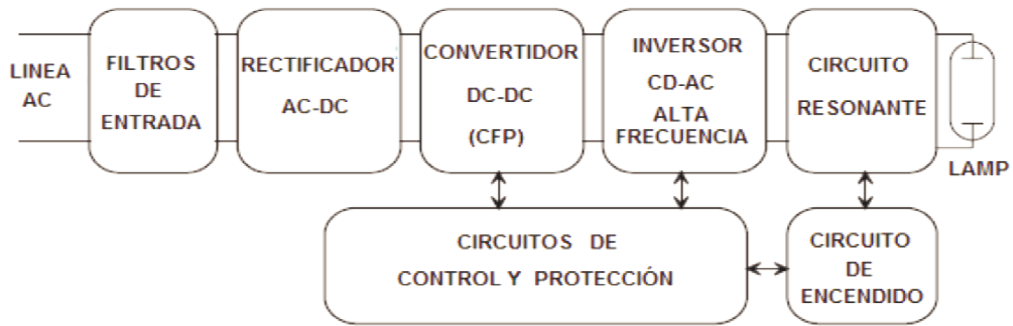


Figura 4- Diagrama en bloques de un balastro electrónico genérico.

lazo de control mediante la introducción de un estimador para el caso de la potencia entregada a la lámpara.

Después de revisar los métodos fundamentales para evitar la resonancia acústica en operación en alta frecuencia, se considera importante plantear las características que debe cumplir un balastro genérico para la operación estable en alta frecuencia, cuyo diagrama en bloques se muestra en la figura 4.

Las etapas más comunes de los balastos electrónicos son descritas a continuación.

- *Filtros de entrada:* Estos filtros son obligatorios para los balastos electrónicos comerciales. Normalmente consisten en uno o dos inductores acoplados y un

condensador. Los filtros de la entrada se usan para atenuar las interferencias electromagnéticas (EMI) y los armónicos generados por las etapas de alta frecuencia de los balastos. También protege el balastro contra posibles transitorios de la línea.

- *Rectificador AC-DC.* Esta etapa se usa para obtener un nivel de tensión continua a partir de la tensión alterna de la línea. Normalmente se usa un puente rectificador de onda completa seguido por un condensador de filtrado. Sin embargo, este rectificador proporciona factor de potencia de entrada bajo y la regulación de tensión es pobre. Para obtener un factor de potencia alto y una tensión



continua a la salida regulada, pueden usarse los convertidores conmutados.

- *Convertidor DC-DC:* La función de esta etapa es corregir el factor de potencia (CFP) hasta los niveles normados, mediante la técnica de emulador de resistencia. Es obligatoria en los balastos electrónicos comerciales, los cuales deben tener un factor de potencia cercano a la unidad.
- *Inversor DC-AC y circuito resonante:* Estas etapas se usan para alimentar la lámpara a frecuencia alta. El inversor genera una forma de onda de alta frecuencia y el circuito resonante se usa para limitar la corriente a través de la descarga. Pueden usarse inductores y condensadores para realizar esta función, con la ventaja de tamaño y peso reducidos ya que operan a frecuencias elevadas.
- *Circuito de encendido:* En la mayoría de los balastos electrónicos, sobre todo para las lámparas de descarga a baja presión, el propio circuito

resonante se utiliza para encender la lámpara y limitar la corriente en estado normal de trabajo. En estos casos, ningún circuito de arranque extra es necesario. Sin embargo, al ser utilizados en lámparas de descarga de alta presión, la tensión de ignición es mucho mayor y se necesita un circuito de ignición adicional.

- *Circuitos de control y protección:* Esta etapa incluye el oscilador principal, amplificadores del error para regular la corriente y la potencia de la lámpara, protección de sobretensión y sobrecorriente, control del tiempo de encendido, protección ante falla de lámpara, etc. Estos circuitos pueden ser muy simples como los usados en los balastos auto-oscilantes o muy complicados, los cuales en algunos casos presentan un control a base de microcontroladores.

A partir de un análisis crítico de cada una de las topologías se realizó el diseño de un balastro electrónico para alimentar una lámpara HM de 150 W. Utilizando el software Pspice se realizaron simulaciones de cada una de las etapas que se muestran a continuación.

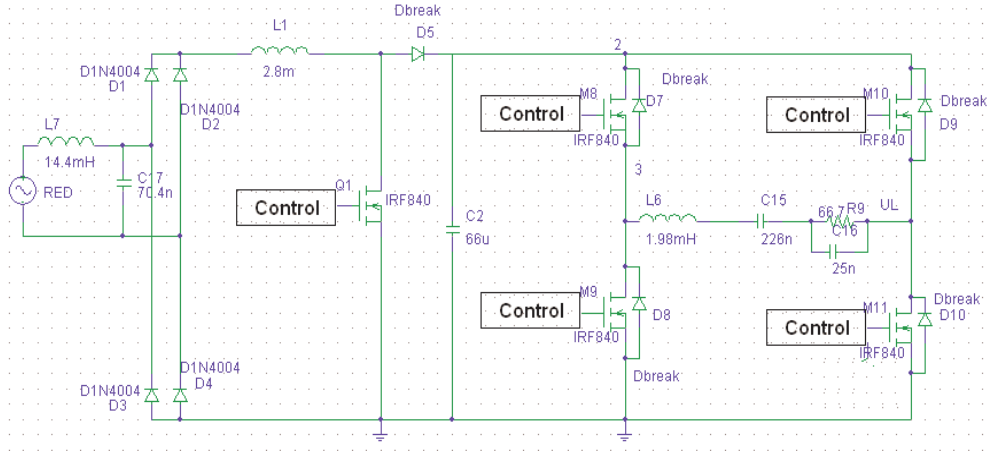


Fig. 5. Esquema del circuito del balasto electrónico.

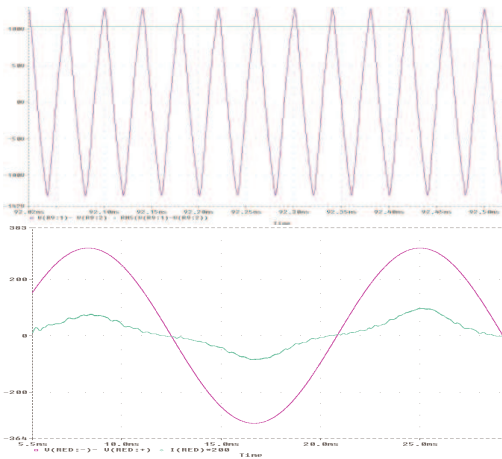


Fig. 6 Formas de onda de tensión de arco y corriente y tensión de entrada del balasto.

Analizando las formas de ondas mostradas se puede comprobar que el balasto diseñado cumple los requisitos de tensión de arco aplicada a la lámpara y presenta un buen comportamiento de corrección del factor de potencia.

Adicionalmente mediante el empleo de un microcontrolador PIC programado de acuerdo al flujograma de la fig. 7 y utilizando el método de detección de

resonancia acústica por cambios en la impedancia y su eliminación por corrimiento de frecuencias hacia zonas libres de resonancia acústica, se realiza el control de dicho balasto.

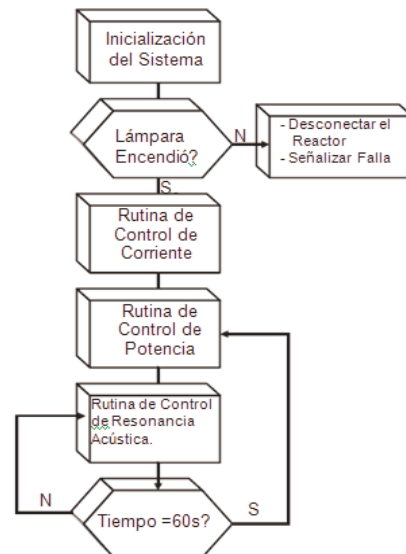


Fig. 7Flujograma de programación

Este software permite controlar la frecuencia de conmutación del inversor.

**Inicialización del Sistema:** cuando se energiza el reactor, el microcontrolador mantiene el sistema de potencia

deshabilitado durante 15 seg. Durante este intervalo de tiempo son enviadas señales para la excitación de los “gates” de los transistores del inversor. Este intervalo debe ser respetado para garantizar que todas las tensiones en los circuitos de comando y en el de potencia se estabilicen y así reducir la corriente de “inrush” en el rectificador de entrada. Terminado este intervalo de 15 seg el inversor inicia su funcionamiento con una frecuencia inferior a la nominal denominada frecuencia mínima ( $f_{\min}$ ), a fin de facilitar la ignición y disminuir el tiempo de calentamiento de la lámpara.

**Comprobación de Ignición:** en esta etapa el microcontrolador mantiene el sistema habilitado con  $f_{\min}$  durante 60 seg, intervalo durante el cual la corriente de la lámpara es leída periódicamente con el fin de detectar la ignición de la misma. Si después de este tiempo la lámpara no entra en funcionamiento el sistema es deshabilitado por 60 seg pues este comportamiento puede estar relacionado con la alimentación de una lámpara caliente. Este proceso es repetido 5 veces con intervalos de 60 seg, si al término del quinto intento la lámpara no entra en funcionamiento el sistema se desactiva definitivamente, ya

que se presupone que la misma no esta insertada en su receptáculo o esta dañada.

**Rutina de Control de Corriente:** una vez que la ignición de la lámpara haya sido detectada el microcontrolador entra en la rutina de control de corriente. Como el sistema se inicializa con una frecuencia inferior a la nominal es necesario que se controle la corriente dentro de ciertos límites a través de la frecuencia de conmutación del inversor. Una vez alcanzado el valor correcto de corriente de la lámpara el programa pasa a la próxima subrutina.

**Rutina de Control de Potencia:** con señales provenientes de sensores de corriente y de tensión de tipo efecto Hall, el microcontrolador actúa sobre la frecuencia de conmutación hasta estabilizar la potencia de la lámpara. Tal control se realizaría de manera lenta ya que la lámpara no cambia sus parámetros de forma abrupta. Una vez alcanzada la potencia nominal, el microcontrolador pasa a la próxima rutina. En caso de que se manifieste el fenómeno de la resonancia acústica durante este intervalo el reactor no intervendrá en el funcionamiento de forma correctiva. Este debe lograr que una vez cambiado el ciclo de trabajo

para controlar la potencia no salga del MCD ya que de lo contrario no cumpliría la CFP de forma natural [18].

### **Rutina de Control de Resonancia**

**Acústica:** después de alcanzada la potencia nominal, las señales de los sensores de corriente y tensión son utilizados para calcular la impedancia de la lámpara. Este valor es utilizado a través de algunas comparaciones para detectar la ocurrencia de resonancia. Si esta fuese detectada, la frecuencia de conmutación del inversor es variada en ambas direcciones en búsqueda de una región libre de resonancia. Hasta tanto la impedancia no retorne a su valor correcto, la frecuencia del inversor se mantendrá variando en torno a la frecuencia nominal. Cada 60 seg el programa vuelve a la rutina de Control de Potencia para hacer los ajustes necesarios. Para evitar que el microcontrolador pueda detectar resonancia acústica de forma errónea se deberán efectuar cerca 14 mediciones distintas en intervalos regulares de 1 seg utilizándose una media de estas mediciones.

### **Conclusiones**

Fueron descritos los métodos de estabilización de lámparas HID operando a alta frecuencia, los cuales

tienen implícito diferentes estrategias para la detección y/o eliminación de la resonancia acústica. Las estrategias presentadas fueron: inyección de una frecuencia modulada, la limitación del contenido de armónico y la operación en ventanas libres de resonancia acústica. Estos métodos tienen en común el actuar y controlar determinadas magnitudes en el balastro para garantizar la operación estable de la lámpara. Finalmente se utiliza el método de cambios en la impedancia para situar la operación de la lámpara en una zona libre de resonancia acústica. Dicho balastro fue diseñando mediante simulación.

### **Referencias**

- [1]. W. Yan, Y.K.E. Ho, and S.Y.R. Hui, "Investigation on Methods of Eliminating Acoustic Resonance in Small Wattage High-Intensity-Discharge (HID) Lamps" in Proc. IEEE Ind. Applicat. Conf., 2000, pp. 3399-3406.
- [2]. García García, J. "Balastos electrónicos no resonantes para lámparas de alta intensidad de descarga: aportaciones en el circuito de arranque y en las etapas de calentamiento y régimen permanente", Ph. D. Dissertation, 2003, Universidad de Oviedo, Spain.
- [3] M. Shen, Z. Qian, F.Z. Peng,

“Control Strategy of a Novel Two-Stage Acoustic Resonance Free Electronic Ballast for HID Lamps” Proc. IEEE Ind. Applicat. pp. 209-212.

[4] J.J. de Groot, J.A.J.M. Van Vilet “The high pressure sodium lamp” Philips Technical Library, Macmillan Education, © 1986.

[5] J. Melis, O. Vila-Masot “Low frequency Square wave Electronic ballast for gas discharge lamps”. United States patent No. 5428268, date of patent: jun, 27 1995.

[6] J. Melis, “A power control current source, circuit and analysis” Proc. IEEE APEC 1994, pp. 856-861.

[7] M. Ponce, A López, J. Correa, J. Arau, J.M. Alonso, Electronic Ballast for HID lamps with high frequency Square wave form to avoid acoustic resonante” Proc. IEEE APEC 2001, pp. 658-663.

[8] J. García-García, J. Cardesin, J. Ribas, A.J. Calleja, E.L. Coromas, M. Rico-Secades, J.M. Alonso “New Control Strategy in Square-wave inverters for low wattage Metal Halide lamps suplí to avoid Acoustic Resonances” Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. Vol. II. 2004, pp. 984-990.

[9] J.W. Denneman “Acoustic Resonances in High frequency operated low wattage Metal Halide lamps” Philips Journal of research Vol. 38. Nos. 4/5,

1983.

[10] Rico-Secades, M. García, et all “Complete low Cost two-stage ballast for a 70 W high pressure sodium lamp base don a Current-Mode-Controlled Buck-boost inverter” Proc. IEEE IAS 2002.

