

## Control por Modos Deslizantes Aplicado a un Balastro Electrónico Libre de Resonancias Acústicas

René Osorio Sánchez, Marco Antonio Oliver Salazar, Mario Ponce Silva

Departamento de Ingeniería Electrónica

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)

62431, Cuernavaca, Morelos

Tel.: 01 (777) 318-7741, reneosorios@yahoo.com

**Resumen.** En este artículo se presenta el análisis e implementación de un control de intensidad luminosa basado en la estrategia de control de modos deslizantes para un balastro electrónico (sin tanque resonante) que estabiliza la corriente en una lámpara de halogenuros metálicos de 70W por medio de un convertidor reductor. Este convertidor opera en modo de conducción continuo (MCC), para evitar un estrés excesivo en los semiconductores, por lo que se requiere de una etapa de control en lazo cerrado para estabilizar la corriente en la lámpara. Para este propósito se utilizó un control robusto (modos deslizantes), debido a que esta estrategia de control presenta un buen seguimiento de la referencia y una buena respuesta dinámica cuando se implementa un control de la intensidad luminosa (dimming), evitando que la lámpara se destruya o se apague. El esquema propuesto alimenta con formas de ondas cuadradas en baja frecuencia a la lámpara que evita la incidencia del fenómeno conocido como resonancias acústicas. El artículo incluye los análisis, simulaciones y resultados experimentales del control aplicado al balastro propuesto.

**Palabras claves:**

Control por modos deslizantes, balastro electrónico,, resonancias acústicas, tanque resonante, ondas cuadradas, convertidor reductor, modo de conducción continuo, control de intensidad luminosa.

### I. INTRODUCCIÓN

En el área de balastros electrónicos, existen topologías que requieren de una etapa de control en lazo cerrado para estabilizar la corriente en la lámpara. Este es el caso de los balastros electrónicos que alimentan a lámparas de alta intensidad de descarga (HID, por sus siglas en inglés) con formas de ondas cuadradas (manteniendo constante la potencia instantánea) [1,2]. Estas topologías tienen como principal fin el de evitar la aparición del fenómeno conocido como resonancias acústicas.

El fenómeno de resonancias acústicas en lámparas HID consiste básicamente en ondas de presión del gas de relleno ocasionadas por las variaciones en la potencia consumida por la lámpara. Estas ondas de presión deforman el arco de descarga, el cual puede llegar a tocar el vidrio de la ampolla provocando puntos de calentamiento, que en la mayoría de los casos se rompen [3].

En general, en las lámparas de descarga el arco de descarga se extingue si la potencia disminuye por debajo de un límite inferior (aproximadamente el 50% de la potencia nominal). Por lo tanto para evitar esta extinción del arco, es importante que el control de intensidad luminosa del balastro electrónico tenga un buen desempeño en cuanto al seguimiento de la referencia. Adicionalmente es importante tener una buena respuesta dinámica en sistemas de iluminación donde se den cambios en la tensión de línea o cambios de carga.

Por otro lado, alimentar con formas de ondas cuadradas a las lámparas de HID, implica el uso de un ignitor para encenderlas. En este artículo se propone ignitor que está basado en una red resonante y actúa durante un tiempo muy corto (aproximadamente 40µs). Debido a que este circuito resonante opera en resonancia, puede operar a frecuencias muy elevadas con pérdidas nulas en conmutación reduciendo el tamaño de los elementos pasivos involucrados.

Con la finalidad de evitar la aparición de resonancias acústicas y reducir el número de elementos (capacitor resonante, semiconductores) que integran el balastro electrónico, se han presentado algunos balastros electrónicos que alimentan con formas de ondas cuasi-cuadradas a las lámparas de HID [4-11]. Sin embargo, un control de intensidad luminosa es complicado de realizar debido a que se tiene un control del tipo encendido-apagado. Esto también trae como consecuencia que se tenga una respuesta dinámica pobre y un

seguimiento de referencia deficiente. Además, estas topologías tienen un estrés elevado en tensión en el único interruptor de la etapa inversora y se tiene un desgaste excesivo en uno de los cátodos de las lámparas, debido a una considerable asimetría de la tensión proporcionada por el inversor con respecto al eje temporal. Por otro lado, la etapa inversora requiere de una inductancia para producir una forma de onda de tensión bipolar. En [12] se presenta un balastro similar en donde se utiliza un control sencillo retroalimentando la corriente en la lámpara y utilizando una red de compensación. Sin embargo, no se presentan análisis de la etapa de control ni pruebas de cambios en la intensidad luminosa. Su principal ventaja es que los cátodos se desgastan por igual y el estrés se reparte entre dos interruptores. Sin embargo, esto se logra a costa de hacer uso de elementos adicionales (2 inductores y 2 semiconductores). Otra desventaja es que las formas de ondas son más deformes que en el caso anterior debido a la alta frecuencia de conmutación.

En [13] se presenta un balastro electrónico que alimenta con ondas cuadradas a una lámpara de halogenuros metálicos. La etapa de control se diseña con la metodología clásica de control, por lo tanto, el análisis de este balastro solo asegura su buen funcionamiento dentro de una región considerablemente pequeña y cercana al punto de operación. Lo anterior no asegura que la lámpara no se apague ante una prueba del tipo escalón unitario (reacción instantánea ante algún imprevisto o ante un control de intensidad luminosa) de la intensidad de la luz, o peor aun, que el sistema se vuelva inestable y provoque una falla o su destrucción ante estos sucesos. El arco de descarga se estabiliza con un convertidor Reductor-Elevador operando en modo de conducción discontinuo (MCD), por lo que el estrés en los semiconductores es considerablemente alto. Además, requiere de elementos extras para evitar que el convertidor no entre en modo de conducción continuo (MCC).

En este artículo se presenta un balastro electrónico que evita la aparición de resonancias acústicas debido a que alimenta, para fines prácticos, con potencia constante (ondas cuadradas) a una lámpara de Halogenuros metálicos de 70W (CDM70W830PH).

La etapa de control se diseña usando una estrategia de control eficiente (control por modos deslizantes: SMC, por sus siglas en inglés) lo cual permite un buen seguimiento de la referencia y una buena respuesta dinámica [14-17]. La estrategia de control es implementada analógicamente. No obstante es importante mencionar que se está trabajando en implementar dicha estrategia en forma digital, para reducir elementos y por lo tanto costos.

Las simulaciones del balastro electrónico se llevaron a cabo usando el paquete Simnon y para emular el comportamiento de la lámpara se adaptó el modelo de lámpara de descarga propuesto en [18]. En este modelo, se representa a la lámpara como una resistencia dependiente de la corriente en la lámpara. Asimismo se utiliza una red RC con doble propósito, una para integrar la corriente en la lámpara y otra para emular la dinámica de la lámpara.

El balastro electrónico consiste en tres componentes principales: un convertidor reductor operando en MCC que se encarga de estabilizar la corriente de descarga, un inversor que invierte periódicamente la corriente entregada a la lámpara y un ignitor. La operación en MCC del convertidor reductor reduce considerablemente el estrés en los semiconductores en comparación con el MCD. Asimismo, este convertidor ajusta el bus de CD al valor requerido por la lámpara (aproximadamente 90V). La lámpara se enciende con un ignitor diseñado en alta frecuencia, por lo que su tamaño es reducido.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: en la siguiente sección se analiza brevemente la etapa de potencia del balastro electrónico propuesto, en la sección III se analiza a detalle la etapa de control, en la sección IV se muestran las simulaciones y los resultados experimentales, y, por último, se presentan las conclusiones derivadas de esta investigación.

## II. ETAPA DE POTENCIA

El diagrama a bloques del balastro electrónico propuesto se muestra en la fig. 1. El convertidor reductor opera en MCC y se alimenta con un bus de cd, que en el mejor de los casos puede ser proporcionado por un convertidor CD-CD para corregir el factor de potencia (FP). La función principal del convertidor reductor es estabilizar la descarga del arco y alimentar al inversor.

El inversor alimenta con ondas cuadradas de baja frecuencia (400Hz, para evitar el efecto de elementos parásitos) a una lámpara de halogenuros metálicos de 70W, con la finalidad de eliminar las resonancias acústicas y reducir el efecto de los elementos pasivos (del ignitor).

El ignitor consta una red resonante  $L_r C_r$  serie,  $L_r$  esta acoplada a  $L_s$ , formando un autotransformador, el cual permite elevar a mayor tensión (4.5kV pico) y de esta forma asegurar que la lámpara encienda. La secuencia de encendido dura 60 $\mu$ s, esto es 6 pulsos de 100kHz. Una vez que la lámpara a encendido, la frecuencia de operación del inversor se reduce a

400Hz a esta frecuencia la impedancia de la inductancia del ignitor se reduce a casi cero (corto circuito) y la impedancia del capacitor aumenta hasta un valor suficientemente grande como para ser considerado un circuito abierto.

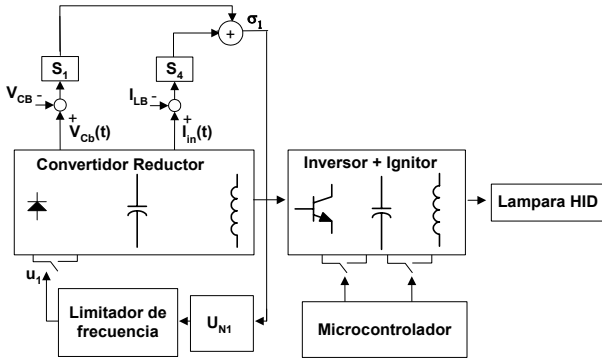


Figura 1. Diagrama de bloques del balastro electrónico propuesto.

### III. ETAPA DE CONTROL

Muchos artículos han presentado una variedad de pasos de diseño para la estrategia de control de modos deslizantes [14-17,19,20], y pueden ser resumidos como sigue: Proponer la superficie de deslizamiento, verificar la existencia del modo de deslizamiento, y analizar la estabilidad en la superficie de deslizamiento.

Típicamente, la superficie de deslizamiento es una combinación lineal de las variables de estado. Esto se debe a que se facilita la implementación y el análisis. El SMC obliga al sistema a mantenerse dentro de la superficie, para después ser llevado al punto de equilibrio, el cual debe ser incluido en la superficie de deslizamiento.

#### Modelado del sistema

El esquema propuesto (fig. 2(a)) puede simplificarse como sigue: El ignitor es diseñado en estado estable de tal forma que su influencia sea despreciable fig. 2(b). El inversor demanda una corriente constante al convertidor reductor, por lo tanto puede eliminarse, fig. 2(c). Por último se sustituyen los semiconductores por interruptores ideales y la lámpara se considera como una resistencia constante (fig. 2(d)). Es importante aclarar que en simulaciones se toma el modelo propuesto en [18].

El sistema resultante en forma matricial considerando la posición de  $u_1$  (1 ó -1) es:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -w_0 \\ w_0 & -w_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde:  $w_0 = \frac{1}{\sqrt{L_B C_B}}$ ,  $w_1 = \frac{1}{RC_B}$ ,  $b = \frac{Vin}{\sqrt{L_B}}$

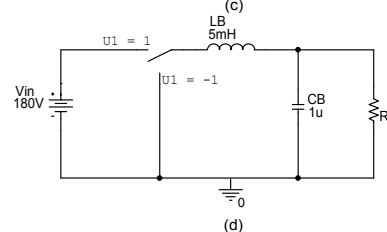
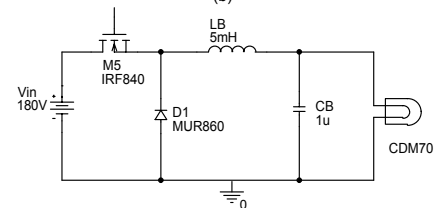
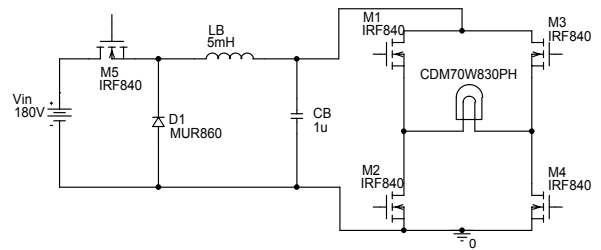
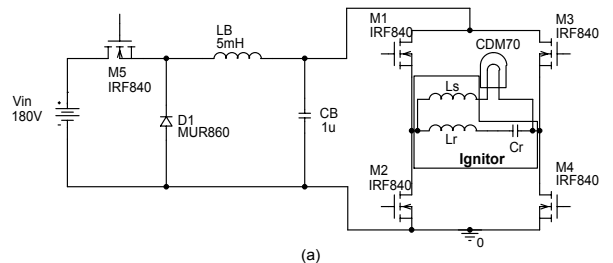


Figura 2. Simplificaciones del balastro: (a) etapa de potencia completa, (b) sin ignitor, (c) sin inversor, (d) utilizando un interruptor ideal y considerando a la lámpara como una resistencia.

$$x_1 = \sqrt{L}i_{LB}$$

$$x_2 = \sqrt{C}V_{CB}$$

O bien:  $\dot{X} = AX + BU + B$  (2)

#### Superficie de deslizamiento

La superficie de deslizamiento propuesta es una combinación lineal de las variables de estado y las referencias, esto es:

$$\sigma = SX - SX_r = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_{1r} \\ x_2 - x_{2r} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde:  $S = [s_1 \ s_2]$ ,  
 $X =$  variables de estado,  
 $X_r =$  referencias.

La ley de control propuesta es:  $u = u_{eq} + u_N$

Donde:  $u_{eq}$  = control equivalente,  
 $u_N = -\text{sgn}(\sigma)$ .

Esta ley de control tiene esta forma solo para el análisis, esto implica que solo asegura la condición de existencia localmente. La ley de control a implementar físicamente no incluye el control equivalente.

Existencia del modo de deslizamiento

Esto implica que debe cumplirse la condición  $\sigma\dot{\sigma} < 0$  [15,19,20]. Se puede demostrar fácilmente que deben cumplirse las siguientes desigualdades para garantizar la condición de existencia del modo de deslizamiento.

$$\begin{aligned} -(s_1 w_0 + s_2 w_1) x_2 - s_2 w_0 x_1 &< 0 \\ -s_1 w_0 x_2 + s_2 w_0 x_1 - s_2 w_1 x_2 + s_1 b &> 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Con la finalidad de asegurar la condición de existencia  $s_1$  y  $s_2$  deben ser positivos.

Análisis de estabilidad en la superficie de deslizamiento

El control equivalente es una herramienta que describe el comportamiento de la superficie de deslizamiento [14]. El control equivalente es válido cuando se hace un análisis de la dinámica del sistema asumiendo que dicho sistema está dentro de la superficie de deslizamiento ( $\sigma = 0$ ), por lo tanto  $\dot{\sigma} = 0$ . Así, el control equivalente ( $u_{eq}$ ) se obtiene de  $\dot{\sigma} = 0$ , resultando:

$$u_{eq} = -(SB)^{-1} (SAX + SB) \quad (5)$$

O bien: 
$$u_{eq} = -\frac{2s_2 w_0}{s_1 b} x_1 + \frac{2(s_2 w_0 b s_1 + s_2 w_1 b)}{s_1 b^2} x_2 - 1 \quad (6)$$

El control equivalente es sustituido en el modelo del sistema, y bajo estas condiciones deberá realizarse un análisis de estabilidad.

**IV. SIMULACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES**

El balastro electrónico fue diseñado con los siguientes parámetros:  $P_o = 70W$ ,  $V_{in} = 180Vdc$ ,  $V_C = 90Vdc$ ,  $I_L = 0.777A$ ,  $L = 5mH$ ,  $C = 1\mu F$ ,  $L_s = 1mH$ ,  $L_r = 250\mu H$ ,  $C_r = 10nF$ , lámpara CDM70W830PH,  $s_1 = 5$ ,  $s_2 = 1$ .

Algunas simulaciones del balastro se muestran en las figs. 3 y 4. En la fig. 3 se muestra la corriente demandada al convertidor reductor y su tensión de salida, en estas figs. se aprecian los efectos de los tiempos muertos. En la fig. 4 se muestra el desempeño del balastro propuesto ante una variación en la potencia en la lámpara del 100% hasta aproximadamente el 50%: Se grafican la corriente demandada y la tensión de salida del convertidor reductor. Como puede observarse se obtiene una buena respuesta dinámica.

Es importante hacer notar que existe una distorsión cuando se dan los tiempos muertos. Sin embargo según los resultados experimentales ese problema se minimiza cuando se observa la tensión y la corriente en la lámpara, fig. 5, en la cual se grafican la corriente y la tensión en la lámpara.

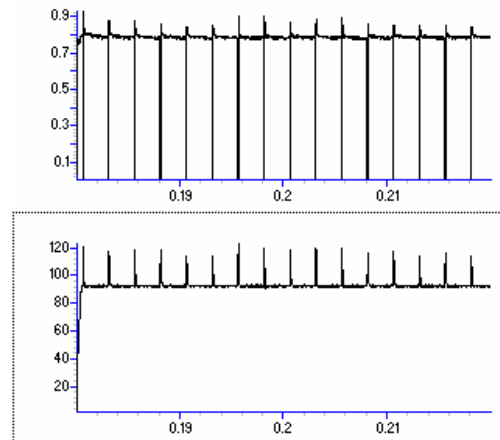


Figura 3. De arriba hacia abajo: corriente demandada y tensión de salida del convertidor reductor

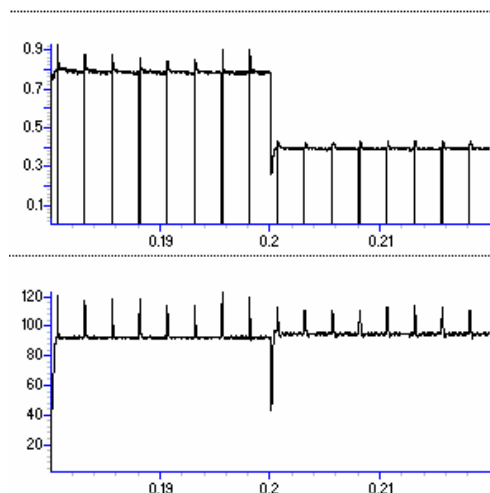


Figura 4. Prueba de “dimming”, de arriba hacia abajo: corriente demandada y tensión de salida del convertidor reductor.

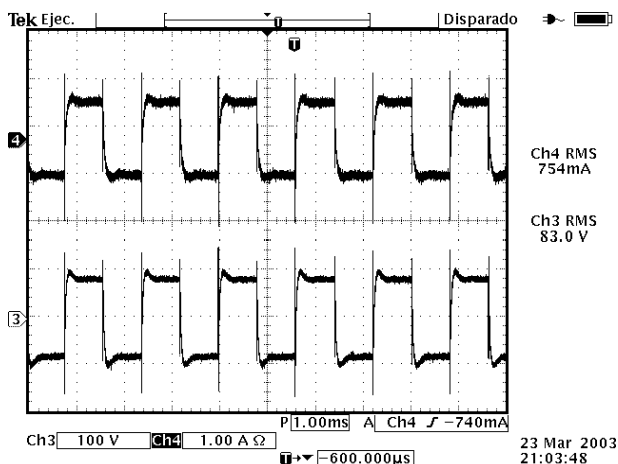


Figura 5. De arriba hacia abajo: corriente y tensión presente en la lámpara.

En la fig. 6, se muestran los resultados experimentales del desempeño del balastro ante una variación en la intensidad luminosa del 100% al 50%: se grafican la referencia de corriente, la corriente y la tensión en la lámpara. Como puede observarse se tiene una buena respuesta dinámica y un buen seguimiento de la referencia, con lo cual se asegura que el arco en la lámpara no se extinga.

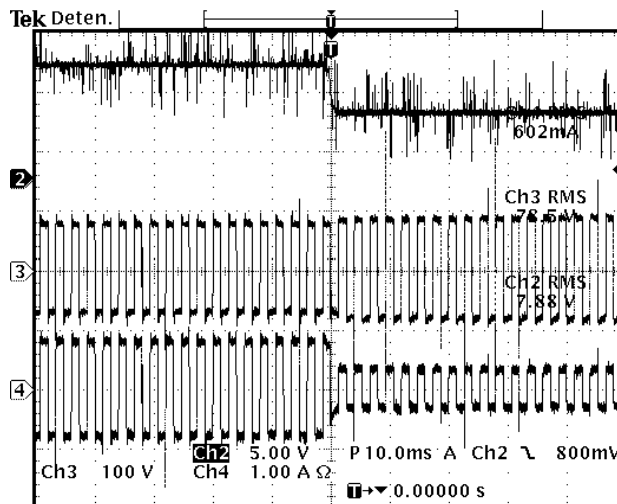


Figura 6. Prueba de “dimming”, de arriba hacia abajo: corriente y tensión de salida del convertidor reductor.

## V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un balastro electrónico que evita la aparición de resonancias acústicas debido a que utiliza un convertidor CD-CD (configuración reductora operando en MCC) para estabilizar la descarga del arco. Asimismo con este balastro se puede realizar un control de intensidad luminosa en forma segura debido a su buena respuesta dinámica consecuencia del uso de una estrategia de control no lineal (SMC).

Las pruebas experimentales mostraron el buen desempeño del balastro electrónico propuesto. Se obtuvieron formas de ondas más cuadradas con respecto a las reportadas en el estado del arte y con esto la probabilidad de que aparezca el fenómeno de resonancias acústicas es prácticamente nula. Asimismo se observó un buen seguimiento de referencia y una buena respuesta dinámica del balastro propuesto ante un cambio de intensidad de luz, evitando que se extinga el arco de descarga de la lámpara.

## REFERENCIAS

- [1] J. J. Groot and J. A. J. M. Van Vliet, "The high-pressure sodium lamp", Editorial Macmillan Education, 1986.
- [2] E. Deng and S. Cuk, "Negative incremental impedance and stability of fluorescent lamp", Proceeding of IEEE Applied Power Electronic Conference, APEC-97, pp. 1050-1056, 1997.
- [3] E. Deng, "I. Negative incremental impedance of fluorescent lamp," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 1995.
- [4] Corominas, E.L.; Alonso, J.M.; Calleja, A.J.; Ribas, J.; Rico-Secades, M.; "Optimizing lamp-power regulation in low-voltage-supplied electronic ballasts by using nonresonant inverters" Industry Applications Conference, IAS-1998, pp. 2060 - 2067.
- [5] Corominas, E.L., Alonso, J.M., Calleja, A.J., Ribas, A., Rico-Secades, S., "A new approach to the design of compact fluorescent lamp ballasts supplied from a very low input voltage: application to flyback inverter", Power Electronics Congress, CIEP 98, pp: 196 -203.
- [6] Corominas, E.L.; Alonso, J.M.; Calleja, A.J.; Ribas, J.; Rico-Secades, M.; "New topologies for low-power and low-input-voltage fluorescent lamp ballasts: tapped-inductor-inverters analysis and design criteria", Industry Applications Conference, IAS-1999, pp. 277 -284.
- [7] Corominas, E.L.; Alonso, J.M.; Calleja, A.J.; Ribas, J.; Rico-Secades, M.; "Analysis of tapped-inductor inverters as low-power fluorescent lamp ballasts supplied from a very low input voltage", Power Electronics Specialists Conference, PESC-1999. pp. 1103 -1108.
- [8] Corominas, E.L.; Alonso, J.M.; Calleja, A.J.; Ribas, J.; Rico-Secades, M.; "A new family of one-switch topologies for low input voltage fluorescent lamp ballast's: tapped-inductor-inverters selection criteria and design methodology"; Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC-2000, pp. 584 -590.
- [9] Rico-Secades, M.; Corominas, E.L.; Ribas, J.; Calleja, A.J.; Alonso, J.M.; Cardesin, J.; "A low cost electronic ballast for a 36 W fluorescent lamp based on current-mode-controlled boost inverter: design example for a greenhouse application with a 120 DC bus power distribution", Industry Applications Conference, IAS-2000, pp. 3445 -3451.
- [10] Corominas, E.L.; Rico-Secades, M.; Fernandez-Rubiera, J.A.; Alonso, J.M.; Calleja, A.J.; Ribas, J.; Cardesin, J.; "A novel low cost two-stage electronic ballast for 250 W high pressure mercury vapor lamps based on current-mode-controlled buck-boost inverter", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC-2001, pp. 676 -682 vol.2
- [11] Rico-Secades, M.; Corominas, E.L.; Alonso, J.M.; Ribas, J.; Cardesin, J.; Calleja, A.J.; Garcia-Garcia, J.; "Complete low cost two-stage electronic ballast for 70 W high pressure sodium vapor lamp based on current-mode-controlled buck-boost inverter" Industry Applications Conference, IAS-2002, pp. 1841 - 1846.
- [12] Ponce, M., Lopez, A., Correa, J.; Arau, J., Alonso, J.M., "Electronic ballast for HID lamps with high frequency square waveform to avoid acoustic resonances", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'2001, pp: 658 -663 vol.2
- [13] Ribas, J., Alonso, J.M., Calleja, A.J., Lopez, E., Cardesin, J., Garcia, J., Rico, M., "Arc stabilization in low-frequency square-wave electronic ballast for metal halide lamps", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '03, pps: 1179 - 1184
- [14] V. I. Utkin, "Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems, MIR Publishers", Moscow, 1974.
- [15] R. A. DeCarlo, S. Zack, G. P. Matthews, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial", proceedings of the IEEE, vol. 76 No. 3, March 1988, pp. 212-232.
- [16] J. Y. Hung, W. Gao, J. C. Hung, "Variable Structure Control: A Survey", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 40, No. 1, Feb. 1993, pp. 2-18.
- [17] P. Mattavelli, L. Rossetto, G. Spiazzi, "General Purpose Sliding Mode Controller For Dc/Dc Converter Applications", IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC'93, pp. 609-615.
- [18] J. Correa, M. Ponce, J. Arau, J. M. Alonso, "Dimming in Metal-Halide and HPS Lamps operating at HF: Effects and Modeling", Industry Applications Conference, IAS'2002 pps: 1467 -1474.
- [19] Vázquez N., Hernández C., Cano R., Antonio J., Rodríguez E., Arau J., "An efficient single-switch voltage regulator", Power Electronics Specialists Conference, PESC'00, pps: 811 -816 vol.2
- [20] Hernández C., Vázquez N., Rodríguez, E., Osorio R., Arau J., "Voltage regulator with unity power factor and high efficiency", Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, pps: 1653 -1658 vol. 3.