

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

Control difuso para la corrección activa del factor de potencia

Fuzzy logic control for active power factor correction

Jhon Jairo Galvis López*

César Augusto Hernández Suárez**

Fredy Hernán Martínez Sarmiento***

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

* Ingeniero Eléctrico y candidato a Magíster en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; actualmente adelanta estudios en Ingeniería Eléctrica en la misma Universidad. Es investigador del grupo Armos. jjgalvisl@udistrital.edu.co.

**Ingeniero Electrónico y Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; actualmente se desempeña como docente de planta en el proyecto curricular de Ingeniería Eléctrica de esta Universidad en el área de Circuitos Digitales y Procesamiento Digital de Señales. Es investigador del grupo ARMOS. cahernandezs@udistrital.edu.co.

Correspondencia: César Augusto Hernández Suárez. Celular: 311 218 66 35. Carrera 54 n.º 64A - 45, torre 5, apto. 902.

*** Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia y especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; actualmente se desempeña como docente de planta en el proyecto curricular de Tecnología en electricidad e Ingeniería Eléctrica de dicha Universidad en el área de electrónica de Potencia, Control y Robótica. Investigador del grupo ARMOS. fmartinezs@udistrital.edu.co.

Resumen

La distorsión armónica que se introduce a la red eléctrica de potencia por el uso masivo de equipo electrónico de baja potencia es actualmente un gran problema de calidad y eficiencia de la red a nivel mundial. La característica no lineal de estos equipos produce grandes armónicos de corriente que generan calentamientos, fallas y sobrecorrientes cuando circulan en un sistema diseñado para 60 Hz. Las soluciones tradicionales basadas en filtros pasivos no logran resolver completamente el problema, si bien diseñarlas a frecuencias de red y potencia del equipo resulta voluminoso y costoso. Por otro lado, las soluciones activas exigen el uso de esquemas de control de alto desempeño, dada la necesidad de reconstrucción de la onda de corriente mientras se realiza regulación de salida, todo ello a una velocidad muy superior a la de la red. En este sentido, se presenta aquí una propuesta de esquema de control basado en lógica difusa para la corrección activa del factor de potencia sobre un convertidor DC/DC tipo *boost*. La estructura y diseño se plantean de acuerdo a las necesidades de operación y desempeño para una aplicación típica de media potencia. El desempeño final se verifica con base en pruebas sobre un prototipo de laboratorio, evaluando y analizando el comportamiento frente a cambios en el voltaje de entrada. Los resultados demuestran una significativa reducción en el contenido armónico (PF = 0.924, THD = 21.2%), y una gran respuesta dinámica alrededor del punto de operación (tiempos de respuesta inferiores a los 100 ms).

Palabras clave: convertidor *boost*, distorsión armónica, factor de potencia, lógica difusa.

Abstract

The harmonic distortion introduced to the power grid by the massive use of low-power electronic equipment, is currently a major global problem of quality and efficiency of the network. The nonlinear characteristic of these devices produces large harmonic currents, which generate heat, faults and over current in a system designed for 60 Hz. Traditional solutions based on passive filters not only fail to solve the problem completely, but are to be bulky and expensive. Active solutions, on the other hand, require the use of high performance control schemes, given the need to rebuild the current wave while output regulation is made, all at a much higher rate than that of network. In this sense, we present here a proposal for a scheme based on fuzzy logic control for active correction of power factor on a DC/DC boost converter. The structure and design are raised according to the operational and performance requirements for a typical medium power application. The final performance is verified by tests on a laboratory prototype, assessing and analyzing the behavior to changes in input voltage. The results show a significant reduction in harmonic content (PF = 0.924, THD = 21.2%), and high dynamic response around the operating point (response times below 100 ms).

Keywords: Boost converter, harmonic distortion, power factor, fuzzy logic.

Fecha de recepción: 4 de marzo de 2010
Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2010

1. INTRODUCCIÓN

Deseosos de reducir la complejidad propia de los circuitos físicos reales (*hardware*) durante la implementación de soluciones tradicionales para el control de convertidores electrónicos de potencia con corrección activa del factor de potencia, muchos autores han planteado diferentes técnicas de control bajo el enfoque de la lógica difusa en las cuales se mezclan diferentes ventajas y desventajas [1], [2], [3]. En la estrategia más generalizada, el esquema de control difuso se diseña inyectando como variables difusas de entrada el error del voltaje de salida, y su variación en el tiempo, o una mezcla de estas dos variables. Sin embargo, dada la dinámica de los correctores activos de factor de potencia, es claro que para reconstruir la señal de corriente de entrada (corrección del factor de potencia) es necesario suministrarle al control difuso información relativa a la energía instantánea que se absorbe desde la red de potencia. La propuesta aquí desarrollada pretende agregar dicha información incluyendo como variable de entrada el error de la corriente de entrada [4]. Pero dado que esta corriente de entrada tiene un valor eficaz que depende de la carga, y como su forma debe ser sinusoidal, ello plantea una definición especial para su valor de referencia [4], [5], [6].

Así, el esquema de control difuso propuesto utiliza tres variables de entrada¹: (1) error del voltaje de salida (E_u), que se utiliza para la regulación del voltaje de salida; (2) error de la corriente en el choque (E_i), con el que se corrige el factor de potencia; y (3) corriente en el choque (I_L), utilizada para limitar la corriente a modo de protección. Es importante anotar que mientras la referencia del voltaje de salida es un valor constante conocido, la referencia de la corriente en el choque es una señal sinusoidal rectificadora cuyo valor eficaz depende del punto de operación del convertidor, es decir, varía con la carga. Por esta razón, se optó por calcularla digitalmente utilizando el valor arrojado por un filtro pasa-bajo y un detector de cruce por cero, bajo la suposición de que el valor DC de salida se ajusta automáticamente cada vez que el convertidor llega a su posición de equilibrio [2], [7], [8], [9].

¹ Sin embargo, según se discute más adelante, solo dos de ellas se utilizan para controlar la dinámica del convertidor en estado estacionario. La tercera se utiliza en zonas particulares de operación como en el arranque del convertidor.

2. TEORÍA DEL CONTROL DIFUSO

La lógica difusa permite trabajar con variables lingüísticas como frío, tibio, caliente, rápido, lento, medio lento, entre otras. El control difuso es uno de los más exitosos exponentes de la teoría de conjuntos difusos [5]. En las estructuras de control digital se manejan dos estados: cierto-falso, 1-0, alto-bajo; mientras que en las estructuras de control difuso se manejan estados intermedios: casi-cierto, 0.3, mediano, entre otros. Consecuentemente, esta teoría permite caracterizar el comportamiento de un sistema por medio de reglas simples de relación (reglas difusas) entre variables lingüísticas. Normalmente, las reglas difusas se expresan en la forma de condiciones difusas:

R_i : SI 'x' es "muy pequeño", ENTONCES 'y' es "muy grande" (1)

Donde 'x' y 'y' son variables difusas, y "muy pequeño" y "muy grande" son etiquetas de los conjuntos difusos. Si existen n reglas, el conjunto de reglas es representado por la unión de estas reglas. Un control difuso se basa en una colección de reglas de control; la ejecución de estas reglas es gobernada por la máquina de inferencia. La figura 1 muestra una representación esquemática de la configuración básica de un control difuso cuya estructura básica está compuesta por cuatro elementos principales: (1) difusión, que convierte los datos de entrada en valores lingüísticos adecuados; (2) una base de conocimiento, que consiste en una base de datos con las definiciones lingüísticas necesarias y el conjunto de reglas de control; (3) una lógica de decisión o máquina de inferencia (concretamente la lógica difusa), que simula un proceso de decisión humano, infiere la acción del control difuso a partir del conocimiento de las reglas de control y la definición de las variables lingüísticas; y (4) una interface de concreción, que produce una acción de control no difuso a partir de una acción de control difusa inferida [2], [10].

El control difuso en convertidores de potencia es una técnica de control que no necesita el modelo dinámico del convertidor, parámetros, o condiciones de operación. Mediante pequeñas adaptaciones, los controladores difusos pueden ser implementados en los convertidores de potencia usando conjuntos difusos para determinar las bases de conocimiento necesarias que describen la dinámica del sistema. Las reglas difusas del control pueden construirse a partir de una tabla en la cual el control procesa las diferentes variables, y toma la decisión más adecuada [1].

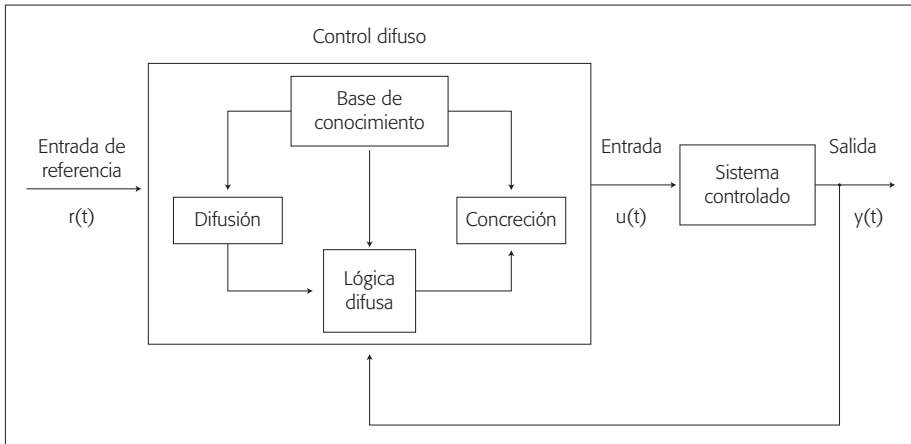


Figura 1. Diagrama funcional de un control difuso

Sin embargo, el control difuso no puede suministrar, en general, mejor respuesta dinámica que la obtenida por un sistema tradicional muy bien sintonizado. La gran ventaja del esquema es la posibilidad de considerar simultáneamente en un esquema de control sencillo, características de regulación y corrección del factor de potencia.

En el control clásico, los controladores difusos se diseñan tomando el error del voltaje de salida y el cambio del error del voltaje, o una mezcla de estas variables. Por lo tanto, para reconstruir la corriente (corrección del factor de potencia) y mejorar la respuesta dinámica del convertidor, es necesario que el control tenga la información de la energía que el sistema consume. Para obtener esto, el error de la corriente de entrada se toma como una variable. De esta manera, la información básica del lazo de corriente de los esquemas de control tradicionales se incluye, pero a la vez permite tener más información en el control, gracias al esquema de control difuso.

3. METODOLOGÍA

El esquema básico del control difuso planteado es el mostrado en la figura 2. El convertidor es representado por una “caja negra” de la cual solo se extraen los terminales correspondientes al voltaje de entrada $v_{in}(t)$, al voltaje de salida $v_o(t)$, la corriente en el choque $i_L(t)$ y el control del transistor Q . Como se puede observar, solamente se utilizan dos variables de estado: el voltaje de salida y la corriente en el choque.

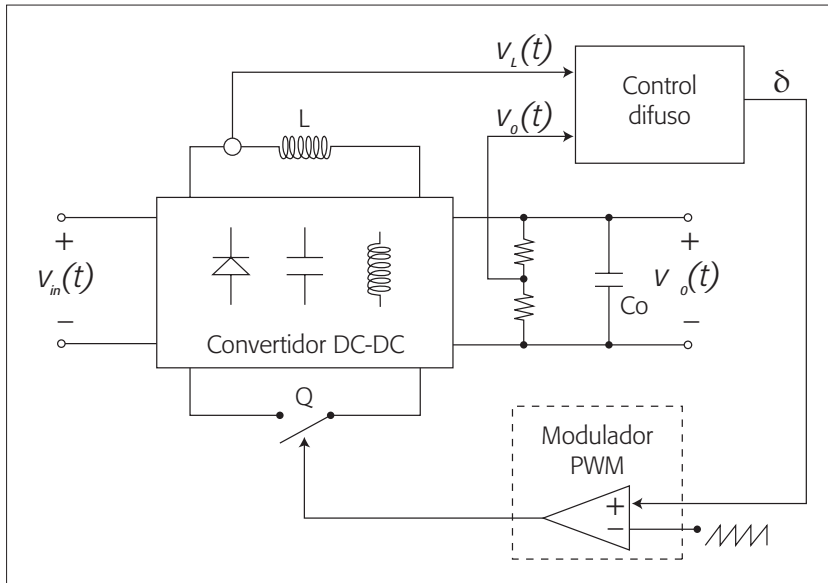


Figura 2. Diagrama de bloques del control difuso

Estructura del control difuso

Lo primero en la definición de la estructura del control difuso es la selección de las variables de entrada. Existen muchos artículos técnicos en la bibliografía relacionada en donde se presentan acercamientos y diseños en los cuales solamente se utiliza como variable en el esquema de control: el voltaje de salida y su tasa de cambio. En estos esquemas no solo no es posible lograr una corrección del factor de potencia, sino que presentan un muy pobre desempeño dinámico [6], [9].

Para lograr mejorar la operación del convertidor, y al mismo tiempo su velocidad de respuesta, se necesita información adicional sobre la energía almacenada en el convertidor, es decir, es necesario medir la corriente en el choque. Esto también es necesario si se desea realizar corrección activa del factor de potencia.

En consecuencia, se utilizan cuatro variables de entrada en el diseño del control difuso aquí planteado: (1) error del voltaje de salida, $E_u(t)$, que se utiliza para la regulación del voltaje de salida; (2) error de la corriente en el choque, $E_i(t)$, empleado para mejorar la respuesta dinámica del conver-

tidor; (3) la corriente en el choque, $i_L(t)$, que se usa para corregir el factor de potencia y limitar la corriente a modo de protección, y (4) el voltaje de entrada $v_{in}(t)$, el cual sirve de referencia seno para la corriente de entrada. Cabe anotar que esta señal realmente no es leída por el control; en su lugar, se maneja una tabla valor absoluto del seno escalada y que se memoriza en ROM (Read Only Memory), a la cual tiene acceso el control difuso. La lectura requerida por el sistema es del cruce por cero del voltaje de entrada para sincronía de la misma. En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques con la estructura del control difuso propuesto.

La referencia del voltaje de salida se encuentra normalmente como una señal externa a disposición del control. En la implementación digital aquí planteada, esta referencia corresponde a una constante programada previamente en la ROM. La referencia de corriente en el choque (I_{LRef}) depende del punto de operación del convertidor. Por esta razón, esta referencia es tomada del mismo circuito de potencia por medio de un filtro pasa-bajos en la suposición de que el valor DC de la corriente es automáticamente ajustado por el convertidor de acuerdo a la condición de balance de potencia.

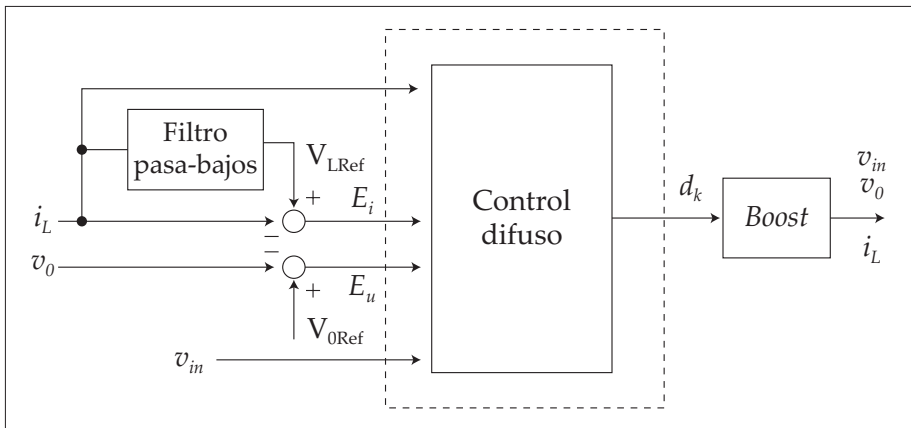


Figura 3. Estructura del control difuso

La salida del control difuso es el ciclo útil, el cual se define como:

$$d[n] = \eta \times \delta d[n] + d[n - 1] \quad (2)$$

Donde $\delta d[n]$ es el cambio inferido del ciclo útil por el control difuso en el n -ésimo instante de muestreo, y η es el factor de ganancia del control difuso. Ajustando η se puede cambiar la ganancia efectiva del control [2], [5], [9].

Funciones de pertenencia

Los conjuntos difusos deben ser definidos para cada una de las variables de entrada y de salida. Como se muestra en la figura 4, se han seleccionado cinco subconjuntos difusos para las variables de entrada $E_u(t)$ y $E_i(t)$ [positivo grande (PG), positivo pequeño (PP), cero (ZE), negativo pequeño (NP), negativo grande (NG)], y cinco subconjuntos difusos para las variables de entrada $i_L(t)$ y $v_{in}(t)$ [muy pequeño (MP), pequeño (P), mediano (M), grande (G), límite (LIMIT)]. Para la corriente en el choque se considera operación normal bajo los primeros cuatro conjuntos; el último conjunto se deja para manejar la condición de corriente límite.

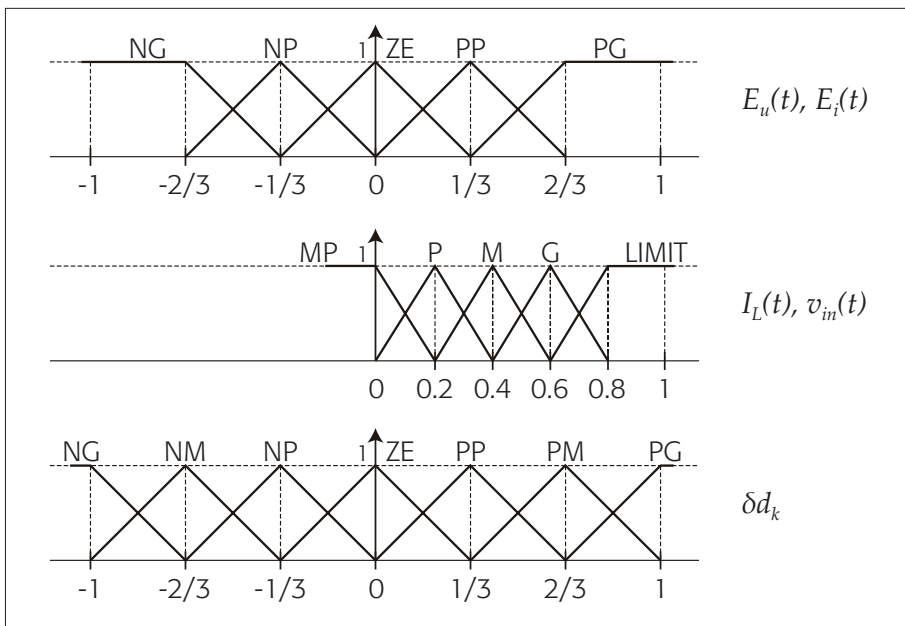


Figura 4. Funciones de pertenencia

Para la variable de salida se utilizan siete subconjuntos difusos (PG, PM, PP, ZE, NP, NM y NG) con el fin de obtener una acción de control uni-

forme. Como se muestra en la figura 4, se adoptan formas triangulares y trapezoidales para las funciones de pertenencia; el valor de cada variable de entrada y salida es normalizado en el rango $[-1, 1]$ utilizando adecuados factores de escala.

Facilitando los cálculos, las variables difusas de entrada se describieron por *singleton* difusos, de tal forma que los valores medidos para estas variables son utilizados en el proceso de inferencia sin pasar por difusión.

Reglas de control difuso

La derivación de las reglas de control difuso es de naturaleza heurística, y basada en los siguientes criterios:

- En condiciones normales ($i_L(t)$ no es LIMIT), cuando el voltaje de salida está lejos de su *set point* ($E_u(t)$ es NG o PG), la acción correctiva debe ser fuerte para minimizar el tiempo de respuesta (gran valor en el incremento del ciclo útil) y llegar al *set point* rápidamente.
- En condiciones normales ($i_L(t)$ no es LIMIT), cuando el voltaje de salida está cerca de su *set point* ($E_u(t)$ es NP, ZE o PP), la acción correctiva debe ser pequeña o nula para minimizar la posibilidad de sobrepaso.
- En condiciones normales ($i_L(t)$ no es LIMIT), cuando el voltaje de salida alcanza su *set point* ($E_u(t)$ es ZE), y la salida aún se encuentra cambiando, el ciclo útil debe cambiar un poco para evitar que la salida se mueva muy lejos.
- En condiciones normales ($i_L(t)$ no es LIMIT), cuando el voltaje de salida alcanza su *set point* ($E_u(t)$ es ZE), y la salida se encuentra estacionaria, el ciclo útil debe mantenerse constante.
- En condiciones normales ($i_L(t)$ no es LIMIT), cuando la salida está por encima de su *set point*, el signo de cambio en el ciclo útil debe ser negativo, y viceversa.
- En condiciones normales ($i_L(t)$ no es LIMIT), cuando la corriente en el choque se encuentra por debajo del voltaje de entrada de referencia, se debe aumentar el valor del ciclo útil a fin de reconstruir la forma de onda de corriente.

- En condiciones normales ($i_L(t)$ no es LIMIT), cuando la corriente en el choque se encuentra por encima del voltaje de entrada de referencia, se debe disminuir el valor del ciclo útil a fin de reconstruir la forma de onda de corriente.
- En condiciones de corriente límite ($i_L(t)$ es LIMIT), si $E_u(t)$ es PG, el incremento en el ciclo útil debe ser cero para limitar el valor de la corriente.
- En condiciones de corriente límite ($i_L(t)$ es LIMIT), si $E_u(t)$ es ZE, el incremento en el ciclo útil debe ser negativo para así evitar sobrepasos indeseados (por ejemplo, durante el arranque con poca carga).

De acuerdo con estos criterios, se construyeron las tablas de control, y se simularon todos los casos posibles en MatLab, a fin de obtener todas las posibles salidas del control difuso. Los resultados de la simulación se codificaron en binario a fin de ser almacenados en una FPGA (Field Programmable Gate Array).

4. IMPLEMENTACIÓN

La figura 5 muestra esquemáticamente la implementación realizada del diseño de control. Allí se pueden observar tres secciones básicas: (1) una primera sección de preprocesamiento, donde las entradas del control son evaluadas, (2) un control difuso basado en una tabla de consulta que almacena los valores de ajuste del ciclo útil como una función de las variables de entrada, y (3) un PWM (Pulse Wide Modulation) que aplica el ciclo útil final al convertidor *boost*. En esencia, se trató de mantener la mayor sencillez posible, así como el uso de equipos y dispositivos de fácil acceso.

El preprocesamiento de las señales se realizó con un microcontrolador de 8 bits Motorola, el M68HC908GP32, mientras que la tabla de consulta se implementó sobre una FPGA SPARTAN 3 de Xilinx.

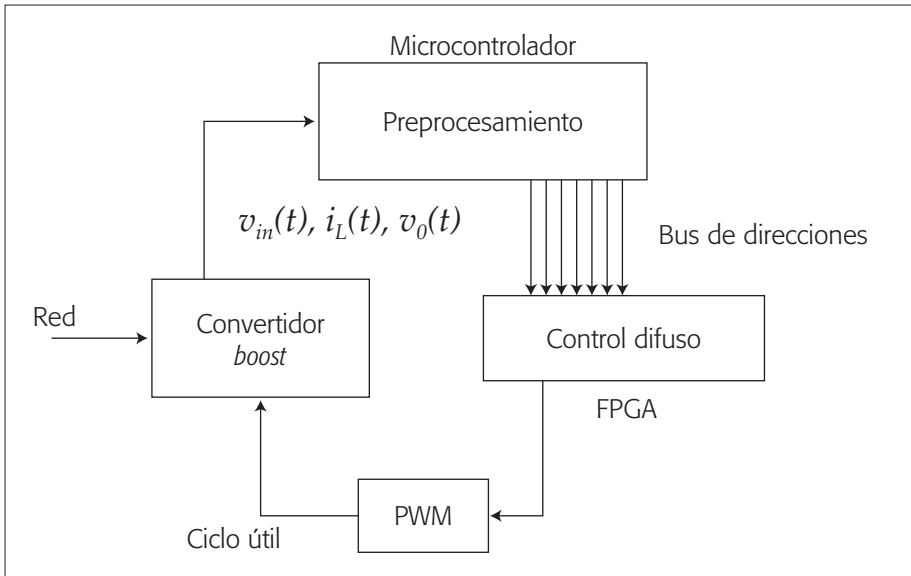


Figura 5. Estructura básica del control

En el bloque de control difuso, las señales de entrada son digitalizadas e inyectadas a los puertos de dirección configurados en la FPGA, ya que estas salidas representan la dirección digital concatenada del valor de ajuste del ciclo útil. Se codificaron las señales a ocho bits, razón por lo cual fue necesario almacenar la información en una FPGA SPARTAN 3.

5. RESULTADOS

La evaluación del esquema de control propuesto fue realizada sobre un prototipo de 200 W. Se diseñó un convertidor *boost* de potencia media con punto de operación en modo continuo, voltaje nominal de salida de 400 V, y alimentado desde la red pública de 120 Vac a 60 Hz a través de un rectificador en puente completo. Este diseño buscaba duplicar una fuente de alimentación de un equipo de comunicación. El convertidor utilizó un choque de salida L de 3 mH sobre un núcleo toroidal T-225-26 de Amidon, y un filtro de salida C_0 de 33 μ F (figura 6).

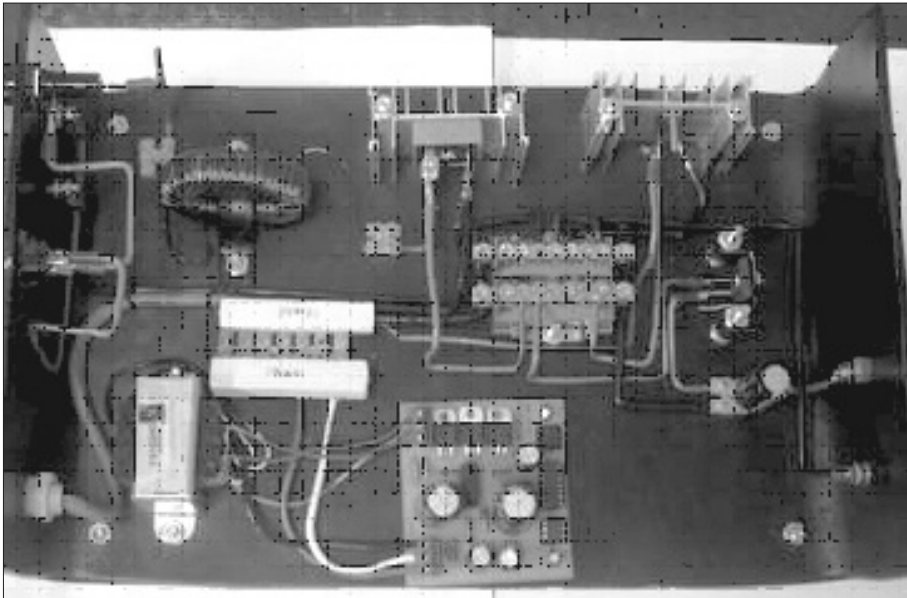


Figura 6. Detalle del convertidor *boost*

El esquema de control fue simulado en MatLab. Se desarrolló un programa que generaba los valores de las señales de entrada al bloque difuso codificadas a 8 bits; luego las inyectaba al bloque de control difuso, y asimismo codificaba las salidas obtenidas para cada caso también a 8 bits. Con estas salidas se construyó directamente una tabla de búsqueda direccionable por los valores del convertidor A/D. Esta tabla se almacenó finalmente en la FPGA.

La figura 7 muestra los resultados capturados por un Fluke 43B del prototipo operando en estado estacionario. Se alimentó el sistema de prueba con un variac monofásico a 120 Vac – 60 Hz onda seno, y se permitió que el control regulara el voltaje de salida sin aplicar cambios ni en la alimentación ni en la carga, la cual fue de 800 Ω . Las lecturas arrojaron un valor de factor de potencia de 0.924 y un THD de 21.1%.

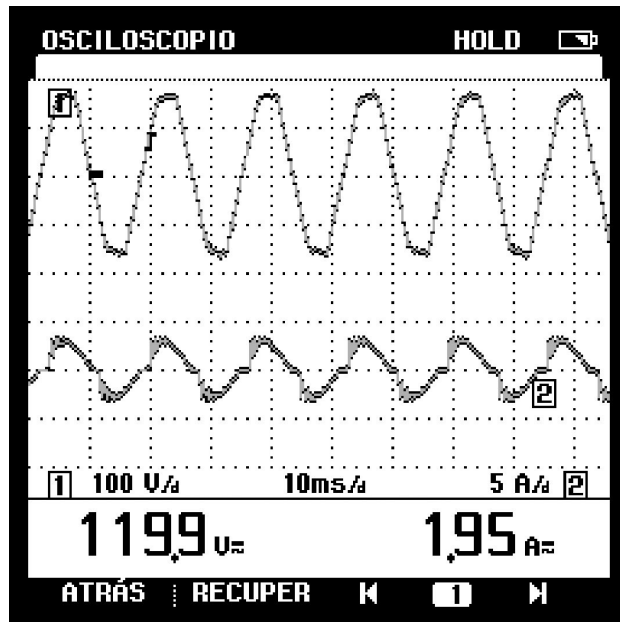


Figura 7. Formas de onda de voltaje y corriente de entrada (Ch1: voltaje de entrada 100V/div y Ch2: corriente de entrada 5A/div, tiempo base 100ms/div)

La figura 8 muestra el contenido armónico de la señal de corriente de entrada medida con el mismo equipo y bajo las mismas condiciones. Aquí es posible observar el nivel de distorsión armónica total (THD) de la corriente de entrada, y la contribución a esta distorsión de los 33 primeros armónicos.

Para comprobar el comportamiento del sistema frente a cambios en la carga, es decir, el desempeño dinámico del esquema de control frente a la regulación del voltaje de salida (principios básico de toda fuente de alimentación), se aplica una variación en la carga ($R_L=500\Omega$ a 800Ω) manteniendo constante el voltaje de entrada (variación a 120 Vac - 60 Hz). Se puede observar en la figura 9 el transitorio generado en el voltaje de entrada que se produce con la alteración. La salida muestra un sobrepico aproximado de 12% y un tiempo de estabilización de 48 ms. En los cambios en la carga, el sistema de control difuso no descuida la forma de onda de la señal de corriente de entrada, y mantiene su forma sinusoidal.

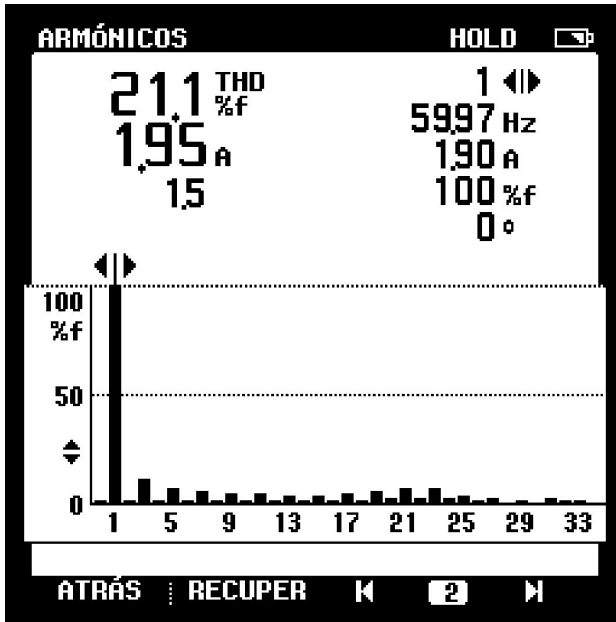


Figura 8. Distorsión armónica en estado estacionario

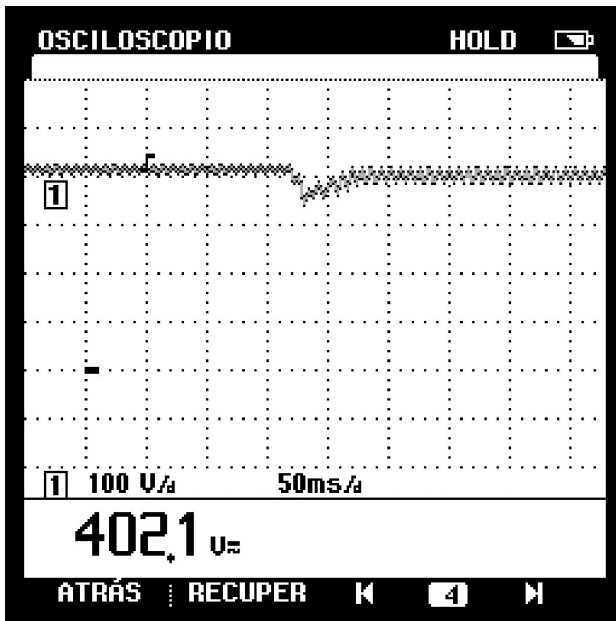


Figura 9. Voltaje de salida (50 V/div), RL se cambia de 500Ω a 800Ω

6. CONCLUSIONES

Se presenta una propuesta de esquema de control difuso para el convertidor DC/DC tipo *boost*, con la intención de desarrollar un prerregulador de voltaje con corrección activa del factor de potencia que cumpliendo con estándares como la IEC 61000-3-2, pueda ser implementado sobre equipos electrónicos de baja y media potencia. En el prototipo de laboratorio se verificó no solo la viabilidad del esquema de control, sino su eficacia en cuanto a reducción de contenido armónico, pues se logra un factor de potencia de hasta 0.924, con valores de distorsión armónica total de 21.2%.

El esquema difuso permitió atacar simultáneamente tres problemas clave del convertidor: regulación de voltaje, respuesta dinámica y corrección activa del factor de potencia. Esto es posible debido a que las reglas del control difuso se pueden asignar en forma separada para varias regiones de operación, lo que permite generar una superficie global de control continua y suave.

REFERENCIAS

- [1] H. Chung, E. Tam, & S. Hui, *Development of a Fuzzy Logic Controller for Boost Rectifier with Active Power Factor Correction*, 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 99, 1999, pp. 149-154.
- [2] A. Khoshooei, and J. Moghani, *Implementation of a Single Input Fuzzy Controller for a High Power Factor Boost Converter*, IEEE AFRICON, 7th Africon Conference in Africa, Technology Innovation, Gaborone, Botswana, 2004, pp. 69-72.
- [3] B. Lin, *Analysis of Fuzzy Control Method Applied to DC-DC Converter Control*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '93, Seattle, 1993, pp. 22-28.
- [4] F.H. Martinez, *Algunas Aplicaciones de la Lógica Difusa en el Control de Convertidores DC/DC*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ARMOS Research group, Bogotá (Colombia), 2011, pp. 15-75.
- [5] A. Rubaai, and M. Chouikha, *Design and Analysis of Fuzzy Controllers for DC-DC Converters*, First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004, pp. 479-482.
- [6] Y. Shi, & P. Scn, *Effects of Different Slopes of Membership Functions on the Fuzzy Control of DC-DC Converters*, Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. PIEMC. 2000, vol. 3, pp.1160-1165.
- [7] H. Lam, T. Lee, F. Leung, & P. Tam, *Fuzzy Control of DC-DC Switching Converters: Stability and Robustness Analysis*, Industrial Electronics Society, IECON '01,

The 27th Annual Conference of the IEEE, 2001, vol. 2, pp. 899-902.

- [8] E. Vidal, L. Martínez, & F. Guinjoan, *Sliding and Fuzzy Control of a Boost Converter using an 8-bit Microcontroller*, IEE Proceedings Electric Power Applications, 2004, pp. 5-11.
- [9] S. Wing, C. Tse, & L. Yim, *Development of a Fuzzy Logic Controller for DC/DC Converters: Design, Computer Simulation, and Experimental Evaluation*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, Issue 1, 1996. pp. 24-32.
- [10] W. Xin, L. Jia and D. Qing, *Output Waveform Reconstruction of Converter by Fuzzy Control Technique*, Proceedings of 2004 International Machine Learning and Cybernetics, 2004, Vol. 2, pp 970 - 974.