

Corrección activa del factor de potencia en cargas no lineales

Active correction of the power factor in no linear charges

FREDY HERNÁN MARTÍNEZ SARMIENTO

Ingeniero electricista y aspirante a magíster en Automatización Industrial Universidad Nacional de Colombia; docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito a la Facultad Tecnológica. Director del Proyecto de Investigación denominado “Nuevos esquemas de control en convertidores electrónicos de potencia”.

fhmartinezs@udistrital.edu.co

DIEGO FERNANDO GÓMEZ MOLANO

Tecnólogo en Electricidad y estudiante de Ingeniería en Distribución y Redes Eléctricas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

diegomez@usa.com

Clasificación del artículo: Investigación.

Fecha de aceptación: junio 30 de 2004.

Fecha de recepción: abril 15 de 2004.

Palabras clave: factor de potencia, convertidores de potencia, corrección activa, distorsión armónica
Keywords: Power factor, converters of power, active correction, and harmonic distortion

RESUMEN

Este artículo describe la implementación de un corrector activo para el mejoramiento del factor de potencia en cargas no lineales. El desarrollo concluye la primera fase del proyecto de investigación denominado “Nuevos esquemas de control en convertidores electrónicos de potencia”, e involucra elementos y conceptos de microcontroladores y electrónica de potencia, con el fin de generar una alternativa de solución diferente a los métodos pasivos convencionalmente utilizados en cargas no lineales para la reducción de la distorsión armónica y el aumento del factor de potencia.

ABSTRACT

This article describes the implementation of an active corrector for the improvement of the power factor in nonlinear loads. The development of the same concludes, in its first stage, in a research project called “New control schemes in electronic power converters” and involves elements and concepts of microcontrollers and power electronic to generate an alternative of a different solution from the conventionally used passive methods in nonlinear loads for the reduction of the harmonic distortion and the increase of the power factor.

1. Introducción

Hoy en día, debido a la masificación en el uso de equipo electrónico en la industria, oficina y residencias, se presenta gran distorsión en las ondas de corriente y voltaje de la red eléctrica, fundamentalmente por los circuitos rectificadores que contienen estos equipos (puente rectificador y filtro capacitivo como fuente primaria de alimentación DC; véase figura 1). Tales circuitos representan confiabilidad y economía, pero como consecuencia de su uso se tiene la presencia no deseada de ciertas fluctuaciones en las ondas fundamentales de voltaje y corriente de la red eléctrica, que generan un alto nivel de armónicos (figura 2, formas de onda típicas

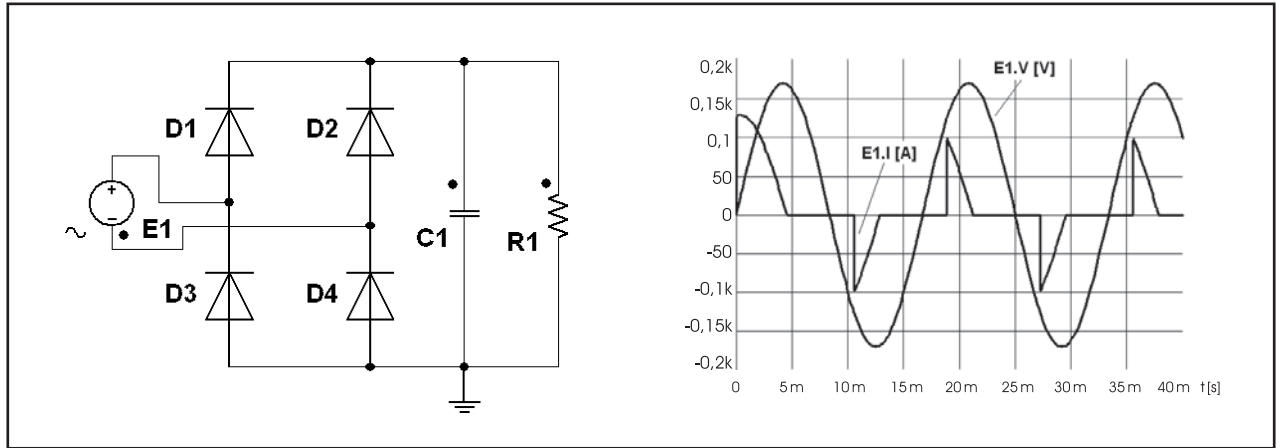


Figura 1. Circuito rectificador con un condensador como filtro y señales de entrada

en un circuito de alimentación DC), que producen consumos adicionales de potencia (potencias de distorsión), y una disminución considerable en el factor de potencia del sistema. Estos problemas se deben a la no linealidad de los circuitos rectificadores.

En la actualidad, este problema es tratado por medio de métodos pasivos como bancos de condensadores, que en general no son solución al problema, porque trabajan muy bien con la señal fundamental pero no cuando existe distorsión armónica. La forma más simple de eliminar los armónicos de corriente es insertando una bobina a la

entrada del sistema, a modo de filtro resonante diseñado para 60 Hz; ella tratará de limitar la corriente de entrada y aumentar su tiempo de conducción. El problema de este método pasivo de solución es el tamaño y costo de la bobina requerida (Martínez, 1997, 45), sin mencionar lo difícil que se hace manejar la corriente de arranque. Se pensó entonces en desarrollar un corrector activo que permitiera reducir la distorsión armónica reconstruyendo la onda de corriente para, entre otros aspectos, aumentar la capacidad instalada y evitar los costos elevados de los sistemas.

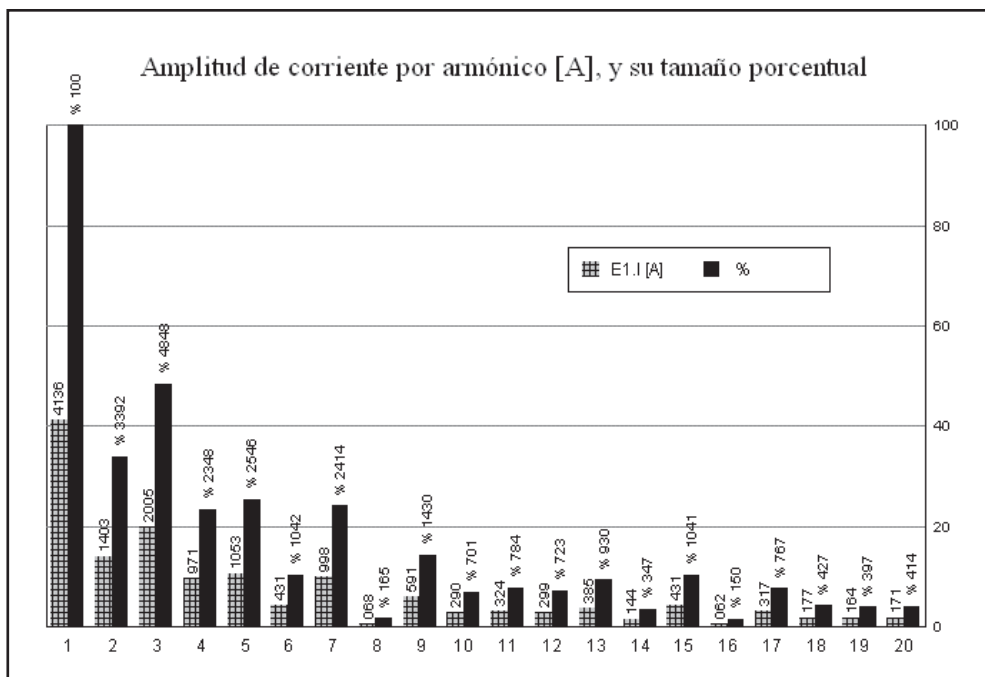


Figura 2. Espectro armónico de la corriente de entrada

3. Distorsión armónica

Típicamente, gran parte de la distorsión armónica generada en las redes de distribución es ocasionada por cargas no lineales (equipo de tipo electrónico como convertidores de potencia, principalmente rectificadores e inversores DC/AC). Por tanto, para minimizar su efecto es necesario introducir en la red equipos de compensación de tipo no lineal (nuevamente equipo electrónico). Normalmente, este equipo de compensación se implementa sobre un convertidor DC/DC.

Dentro de los efectos más comunes que generan los armónicos se encuentran los producidos sobre la instalación eléctrica, sobre la carga del consumidor y sobre los circuitos de comunicación. En la instalación eléctrica, las corrientes con distorsión armónica son el principal problema, ocasionándole recalentamiento y pérdida de vida útil. Los armónicos pueden ocasionar también errores de disparo en los tiristores de equipos convertidores, inexactitudes en algunas mediciones y falsos disparos en los dispositivos de protección. El desempeño de los equipos de los consumidores, tales como variadores de velocidad y fuentes de alimentación de computadores, puede ser adversamente afectado por los armónicos. Además, las corrientes armónicas que fluyen sobre las líneas de potencia pueden inducir ruido sobre líneas cercanas de comunicación. Todo esto sin mencionar los efectos de las corrientes de tercer armónico que circularán por los neutros de la instalación.

3.1 Normas

Debido al acelerado deterioro de la calidad de la potencia distribuida, se han establecido estándares básicos para limitar los niveles de distorsión que un equipo puede introducir en el sistema. Un ejemplo de estas normas es la IEC³ 1000-3, que fija los límites permitidos para los armónicos de la corriente de entrada de equipos eléctricos y electrónicos que tengan que conectarse a la red de distribución alterna de baja tensión, además de las fluctuaciones de tensión que el equipo pueda generar. Esta norma restringe las señales de corriente de acuerdo con su contenido armónico, y a la vez sirve para evaluar la calidad de potencia; las definiciones de términos y conceptos manejados también son definidos por la norma, y empleados en la mayoría de los artículos que desarrollan el tema (Martínez, 2001, 46).

En su sección segunda (IEC 1000-3-2⁴) la norma detalla los límites para equipos con una corriente de

entrada de hasta 16A por fase; éstos son clasificados dentro de cuatro categorías:

- *Clase A:* incluye equipos para el manejo de motores con control por ángulo de fase (la mayoría de las aplicaciones “domesticas”), y virtualmente todo equipo trifásico hasta 16A por fase.
- *Clase B:* abarca todas las herramientas portátiles; los límites son 1,5 veces los de la clase A.
- *Clase C:* incluye todos los productos de iluminación, incluso dispositivos con control de voltaje eficaz (dimmer), con una entrada de potencia activa superior a los 25 W.
- *Clase D:* para productos de baja potencia (75 a 600 W⁵) que cumplan con la envolvente de onda de corriente mostrada en la figura 4. Se considera equipo clase D si la onda de corriente que él produce no se encuentra por fuera de la envolvente en más del 5% del tiempo. A modo de ejemplo, en la figura 4 se muestra una onda de corriente con un 60% de contenido del tercer armónico, la cual está por fuera de la envolvente en cerca del 9% del tiempo; por tanto, el equipo no corresponde a un clase D.

De la normativa se logra deducir que no se requieren equipos con una distorsión armónica total pequeña para la corriente de entrada (ITHD), sino un cumplimiento individual de los límites para cada armónico. Esta circunstancia avala las soluciones pasivas, pues ellas no consiguen un THD pequeño, pero son capaces de limitar las amplitudes de los armónicos de la corriente por debajo de lo establecido en la normativa. La conclusión es importante, pues no es imprescindible obtener un FP = 1 para verificar la norma.

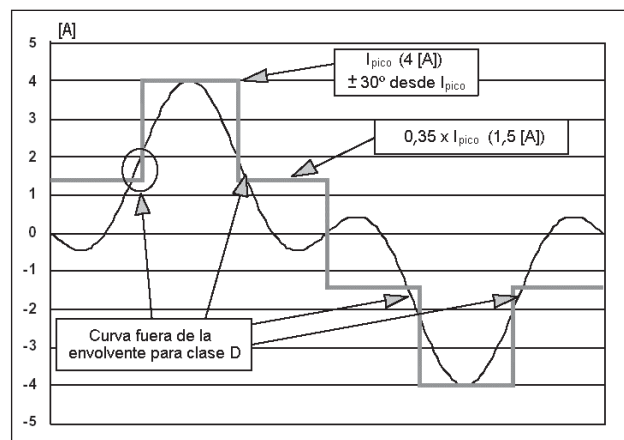


Figura 4. Envolvente para equipos clase D

³ International Electrotechnical Commission.

⁴ Harmonic Currents Emission.

⁵ A partir de 1999, el límite inferior de 75 W se redujo a 50 W.

Aplicando los criterios de la norma, el prototipo de trabajo se clasificó como tipo D, para el cual se tiene el máximo contenido armónico presentado en la tabla 1.

Tabla 1. Máximo contenido armónico permitido para equipo clase D

Orden del armónico n	75 W < P < 600 W [mA/W]	P > 600 W [A]
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.22
13	0.296	0.21
15 ≤ n ≤ 39	3.85/n	2.25/n

4. Solución propuesta

Para la solución de este problema se tienen métodos de corrección pasivos y activos. Dentro de los activos se encuentran los circuitos convertidores; estos circuitos forman o compensan la forma de onda de corriente, para lo cual requieren un tipo de sensor que les permita capturar la información para que el convertidor pueda conmutar y de esta manera realizar la corrección. Los convertidores son dispositivos electrónicos encargados de transformar la señal suministrada a la entrada en otra de características predeterminadas en la salida. Dentro de este concepto, la conversión de corriente continua a corriente continua (DC/DC) tiene una importancia capital, ya que la gran mayoría de los equipos electrónicos e informáticos, de uso doméstico ó industrial, precisan de una alimentación de tensión continua. A menudo, ésta debe obtenerse a partir de la red, siendo necesario realizar previamente una conversión AC/DC. La conversión DC/DC significa la obtención de una tensión continua con unas características determinadas a partir de otro nivel de tensión que no las posee.

4.1 Concepto de emulador resistivo

En el convertidor AC/DC de la figura 5 (esquema clásico de alimentación) se ha interpuesto un convertidor DC/DC entre la salida del puente de diodos y el condensador de filtrado. Este convertidor debe estar concebido para que el puente de diodos lo vea como una carga resistiva; de aquí su nombre “emulador resistivo”, también conocido como pre-regulador corrector del factor de potencia. Sin embargo, este tipo de denominaciones se utiliza para

hacer referencia a todo el sistema, es decir, puente de diodos, convertidor DC/DC y condensador de filtrado.

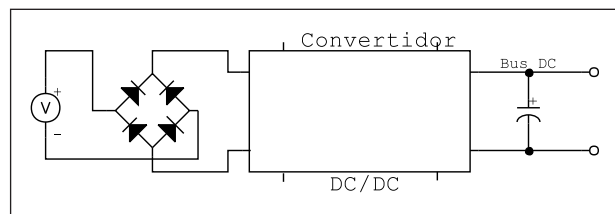


Figura 5. Estructura general de un convertidor AC/DC

Conviene hacer un par de consideraciones importantes sobre la naturaleza del emulador. Se trata de un convertidor conmutado y, por tanto, en condiciones ideales no presenta pérdidas; además, su frecuencia de conmutación debe ser mucho más alta que la de la red, típicamente entre 50 y 200 KHz.

La forma en la cual se consigue elevar el FP es sencilla de explicar. La tensión en la entrada del emulador es una onda sinusoidal rectificada puente completo, que origina una demanda de corriente con la misma forma de onda debido al comportamiento resistivo en la entrada de convertidor. Por tanto, esta onda rectificada genera una demanda de corriente sinusoidal en la red. Idealmente, al ser voltaje y corriente de la misma forma y en fase, se obtendrá un FP igual a la unidad y una distorsión armónica nula. Para lograr este tipo de operación del convertidor, la conmutación del interruptor debe estar relacionada no sólo con el voltaje de salida (regulación de voltaje, lazo de regulación de voltaje), sino con la forma de onda del voltaje de entrada (regulación de corriente, lazo de regulación de corriente).

4.2 Convertidor boost

Para la implementación del corrector se dispone de un convertidor DC/DC topología *boost*. Para obtener un FP de uno, el convertidor *boost* actúa como un emulador resistivo, tomando corriente de entrada que varía instantáneamente en proporción directa al voltaje de entrada rectificado.

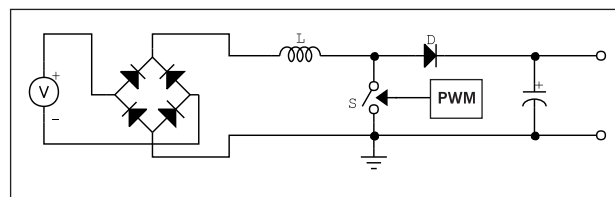


Figura 6. Esquema básico del convertidor *boost*

4.2.1. Funcionamiento

Obsérvese la figura 6. Cuando el interruptor S esté cerrado ($0 < t < T_{ON}$), toda la tensión de la fuente primaria se aplica sobre la bobina (L), lo que provoca que la corriente circulante por la misma aumente, almacenando la inductancia energía durante este intervalo. Si ahora el interruptor se abre ($T_{ON} < t < T$), la tensión que existe en la bobina se suma a la tensión de la fuente, obteniéndose una tensión de salida V_L , siempre superior a esta última y de idéntica polaridad. Al mismo tiempo, la energía almacenada previamente por la bobina se transfiere a la carga a través del diodo D, obligando a la corriente a disminuir.

El hecho de operar un convertidor boost a una frecuencia mucho mayor que la de la red, le permite ser capaz de seguir muy de cerca el voltaje de entrada, con lo cual se tiene como resultado una onda de corriente muy sinusoidal con algún rizado de alta frecuencia. Este circuito se puede montar fácilmente con tan sólo multiplicar una muestra del voltaje de línea rectificado por un voltaje de control que es constante en cada medio ciclo, y que representa la desviación del voltaje de salida con respecto a su valor de referencia, controlando así la cantidad de potencia tomada de la línea por ajuste de la corriente de entrada.

4.2.2. Circuito de control

El control de un circuito emulador resistivo debe ser tal que satisfaga las siguientes necesidades:

- Conseguir que la corriente de entrada del rectificador sea una senoide rectificada.
- Conseguir que la tensión de salida sea la deseada.

La primera de estas necesidades puede satisfacerse mediante la realización física de un lazo de realimentación de la corriente de entrada, cuya referencia sea una senoide rectificada. Este sistema no exige ninguna característica especial a la topología de potencia. La segunda de las dos necesidades se satisface siempre de la misma manera: con un lazo de realimentación de la tensión que obligue a que ésta sea constante.

Para la implementación del boost, en un microcontrolador de 8 bits se desarrolló e implementó un control basado en un control de corriente por histéresis, en el que la

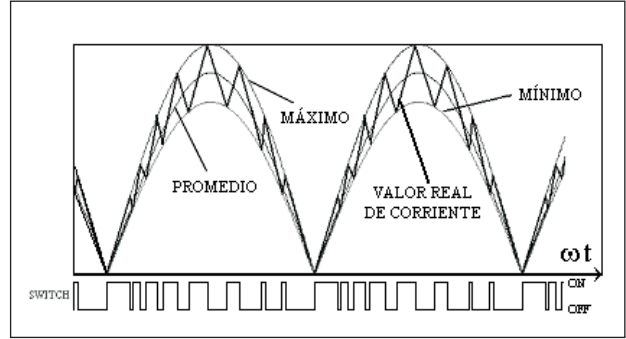


Figura 7. Control de histéresis variable

corriente del convertidor sigue de cerca dos límites para reconstruir la onda de corriente. Los límites seno máximo y mínimo (en la figura 7 se observan los límites para la corriente de entrada y la corriente real obtenida) se encuentran memorizados dentro del microcontrolador, con el fin de poder modificarlos a gusto del diseñador; ya que de los valores de los límites dependerá la potencia de salida deseada. También es posible modificar el programa para que calcule los límites máximo y mínimo, de acuerdo con la potencia exigida por la carga y el voltaje de entrada seno.

La figura 8 muestra un diagrama esquemático del circuito de control utilizado en el diseño, así como las señales muestreadas (voltaje de salida y corriente de entrada, para formar un lazo de control de voltaje y un lazo de control de corriente, es decir, además de corregir la forma de onda de corriente, regula el voltaje de salida) y sus sensores en el circuito de potencia. Las señales análogas son digitalizadas por medio de dos canales de conversión A/D del microcontrolador. El lazo de control de corriente obliga

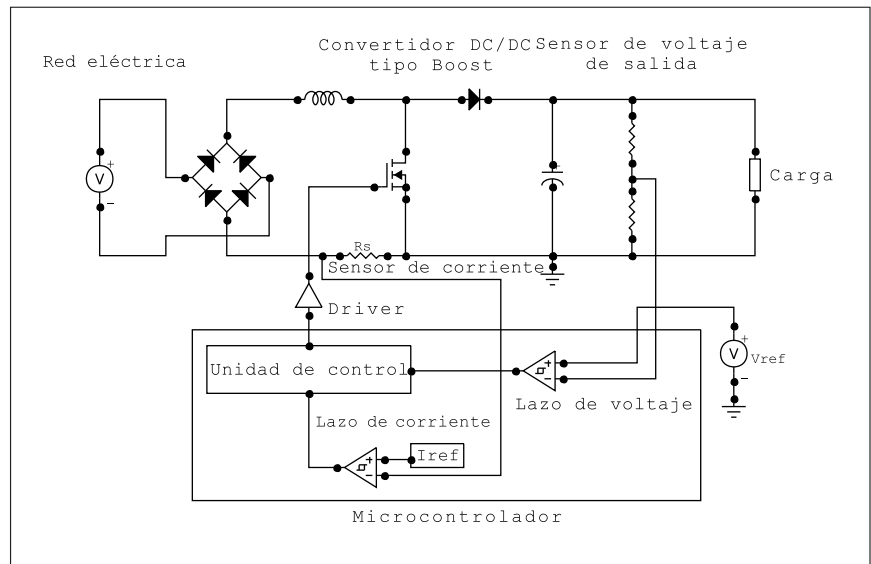


Figura 8. Circuito de control

a que la corriente de entrada se mantenga siempre dentro de una banda de histéresis (programada en la memoria del microcontrolador), limitada por dos ondas seno rectificadas, logrando la corrección de la corriente de entrada. Adicionalmente, se incorpora un segundo comparador alimentado con una señal de referencia (valor constante de 0 a 255 que determina el voltaje de salida, más un delta que determina la banda de histéresis; en el montaje se tomó de ± 10 , lo que corresponde a $\pm 15,6$ voltios sobre la salida) que en el montaje se genera internamente, pero que puede ser controlada externamente como se muestra en la figura citada.

5. Resultados

La señal presentada en la figura 9 es la producida sobre la red eléctrica al ser conectada a ella una carga de tipo no lineal. Aquí se puede observar que la corriente no fluye al circuito todo el tiempo, y la existencia de un factor de cresta elevado.

Nótese que esta forma de corriente muestra el gran deterioro que sufre la onda de corriente sobre la red eléctrica, implicando un bajo factor de potencia y un alto contenido armónico, como se observa en la

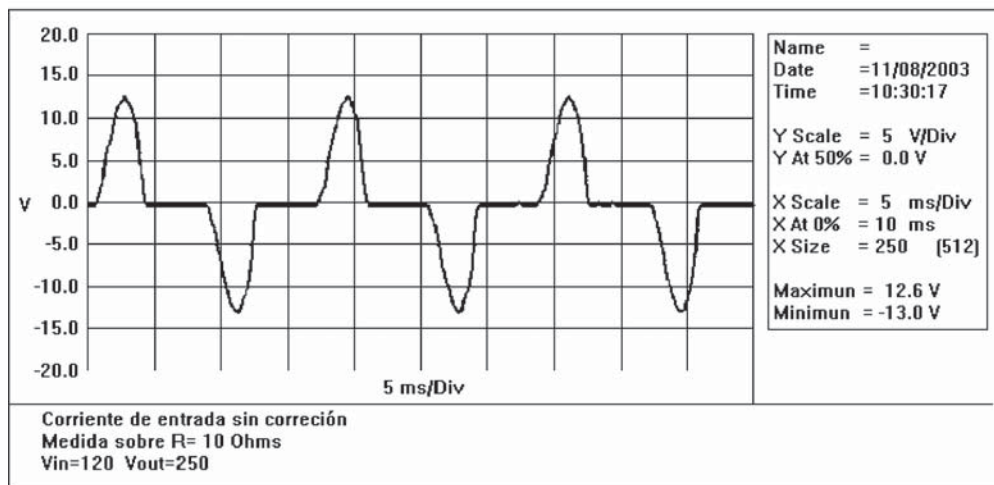


Figura 9. Corriente de entrada sobre el rectificador

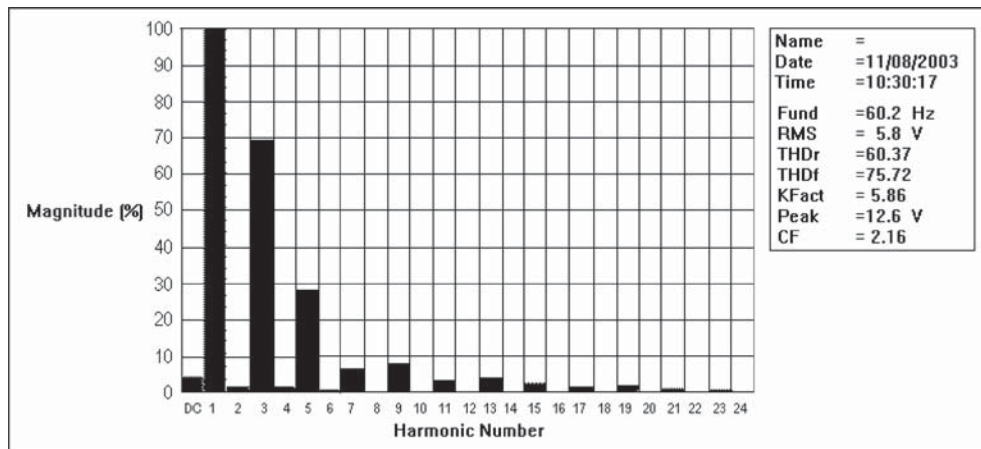


Figura 10. FFT para la corriente de entrada

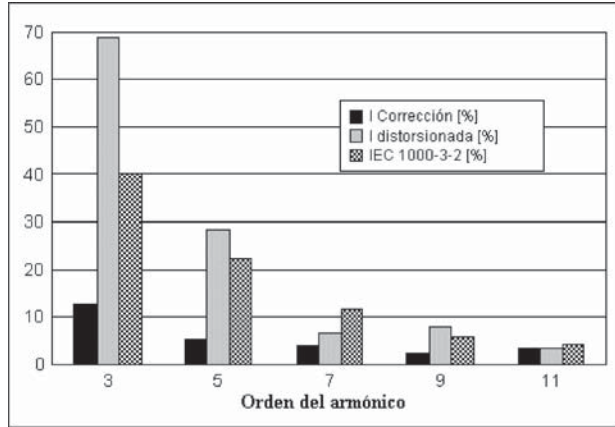


Figura 11. Datos experimentales vs Norma IEC 1000-3-2

figura 9 (contenido armónico obtenido en pruebas de laboratorio).

Luego del desarrollo del convertidor, para una implementación a 200 W – 380 V se compararon los valores obtenidos con la norma IEC 1000-3-2 con los valores mostrados en la figura 10, con el fin de valorar la utilidad del convertidor. De esta forma se obtienen los resultados mostrados en la figura 11; obsérvese la disminución de la distorsión y el cumplimiento de la norma.

6. Conclusiones

El uso de configuraciones pasivas para la corrección del factor de potencia en cargas no lineales tiene como resultado final el incumplimiento de algunas normas como la IEC 61000-3-2. Pudo determinarse que éstas son inadecuadas para enfrentar el problema propuesto, dado que no logran reducir la distorsión armónica y sí resultan costosas y de baja eficiencia en equipos grandes. Por esta razón, cuando se desee aumentar el factor de potencia de una red distorsionada debe pensarse directamente en el uso de un corrector activo, que permite corregir electrónicamente el factor de potencia (de los mismos equipos electrónicos) reconstruyendo la onda de corriente, logrando disminuir la distorsión y elevar el factor de potencia.

El esquema implementado para una baja potencia corroboró los resultados teóricos identificados, además de demostrar la factibilidad de implementar la solución sobre un dispositivo digital considerado como lento para este tipo de aplicaciones. La estrategia de control seleccionada permitió obviar el inconveniente de la velocidad del microcontrolador y obtener a la vez un alto desempeño del sistema. Sin embargo, los niveles de distorsión y el factor de potencia obtenido no fueron tan buenos como se esperaba.

La distorsión (THD) típica de un sistema como el mostrado en la figura 1 se encuentra entre el 70% y 80%; en pruebas de laboratorio realizadas a equipos de potencias similares se obtuvieron valores de 75,7%, mientras que en la implementación del corrector activo con control por histéresis se llegó a valores del 32,7%. Pese a que se cumple la norma para valores individuales de contenido armónico, si se tiene en cuenta que una señal de voltaje típica presenta una THD de 6% al 9%, el nivel obtenido en la señal de corriente es bastante elevado. De otra parte, el factor de potencia alcanzado por el prototipo fue de tan sólo 0,895, mientras fabricantes de circuitos integrados de propósito específico (Texas Instruments y Motorola) reportan valores de 0,990 a 0,999.

En conclusión, el prototipo presenta un desempeño excelente frente a implementaciones pasivas (Martínez, 1997, 30), y un desempeño aceptable frente a normas como la IEC. Los valores obtenidos están limitados por la velocidad del convertidor A/D del microcontrolador, el cual limita la velocidad de respuesta del control. Un A/D de alta velocidad podría virtualmente generar ondas de corriente con factor de potencia de hasta 0,999 (datos obtenidos por simulación).

Referencias bibliográficas

- [1] ANDREYCAK, B. (1999). Unitrode - Texas Instruments Incorporated. Design Note: UC3854A and UC3854B Advanced Power Factor Correction Control ICs – DN44.
- [2] International Electrotechnical Commission (1995). IEC61000-3-2:1995/BSEN61000-3-2:1995. Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 3: Limits. Section 2. Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16A per phase).
- [3] MARTÍNEZ, F. y MENDOZA, W. (1997). “Corrección activa del factor de potencia”. Bogotá, Colombia, Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia.
- [4] MARTÍNEZ, F. (2001). “El Fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas”. Bogotá, Colombia, Revista *Tecnura*, No. 9.
- [5] RAMÍREZ, J. (1985). *El factor de potencia*. Barcelona, España: Ediciones CEAC, S.A.
- [6] TODD, P. (1999). Unitrode - Texas Instruments Incorporated. Design Note: UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design – U134.
- [7] UNITRODE - Texas Instruments Incorporated (1999). UC3854 Data Sheet: High Power Factor Preregulator.