

# Estudio Comparativo entre los Convertidores Flyback y Flyback Multifase para Corrección Activa del Factor de Potencia

Investigación

Dr. Luis Alejandro Flores Oropeza, Ing. Eleazar Padilla Guardado,  
 MC. Alejandro Román Loera, M. C. Luis Enrique Arámbula Miranda  
 Departamento de Sistemas Electrónicos, Centro de Ciencias Básicas  
 Universidad Autónoma de Aguascalientes, Av. Universidad #940, Aguascalientes, Ags.  
 lflores@correo.uaa.mx

## Resumen

En este artículo se propone un convertidor flyback multifase para la corrección activa del factor de potencia como una alternativa viable frente a un único convertidor flyback convencional. De igual manera, se presentan las ventajas que se obtienen al utilizar un convertidor multifase frente a un único convertidor para la corrección activa del factor de potencia. También, se presentan los resultados en simulación así como las ventajas en cuanto a distorsión armónica que se pueden obtener al utilizar un convertidor flyback multifase frente un único convertidor flyback.

**Palabras clave:** convertidor, multifase, corrección activa del factor de potencia.

## Abstract

This paper proposes a multiphase flyback converter for the correction active of power factor as a viable alternative to a single conventional flyback converter. Similarly, there are advantages to be gained by using a multiphase converter front of a single converter for the correction of active power factor. This paper, presents the results in simulation as well as the advantages in terms of harmonic distortion that can be obtained by using a multiphase flyback converter.

**Keywords:** converter, interleaving, power factor correction.

## Introducción

Existen distintas topologías de convertidores en la literatura que pueden ser utilizadas como correctores del factor de potencia (CFP) [1]-[12]. Algunas de estas topologías se utilizan en aplicaciones de balastos electrónicos, convertidores para el control de motores entre otros. Sin embargo, existe una topología de convertidor que es muy utilizada para aplicaciones en corrección del factor de potencia por su simplicidad de construcción y sencillez para controlar, esta topología es conocida como Flyback (Retroceso) [1]. Esta topología presenta la característica de operar como un

emulador de resistencia ante la red eléctrica únicamente manteniendo el ciclo de trabajo constante. Lo anterior significa que manteniendo el ciclo de trabajo constante aplicado al convertidor, esta topología de manera natural se encarga de demandar una corriente sinusoidal de la red eléctrica. No obstante, esta topología no es utilizada en aplicaciones de muy alta potencia debido a que presenta grandes corrientes eficaces que producen elevadas pérdidas de conducción en sus elementos. Sin embargo con la técnica de “Multifase” la topología Flyback resulta una topología atractiva para aplicaciones de mediana y alta potencia al separar la potencia total en múltiples convertidores de menores potencias y de este modo conseguir que la potencia total sea alta con bajas pérdidas.

## Problemática a resolver

Una carga lineal es aquella en la cual la forma de onda de corriente que se demanda es directamente proporcional al voltaje que la alimenta o a la derivada o integral de este. Una carga no lineal se utiliza normalmente para describir las fuentes de alimentación conmutadas que se encuentran en computadoras personales.

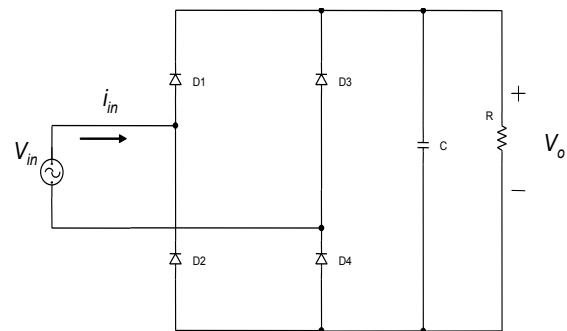


Figura 1. Circuito rectificador y filtrado por capacitor que demanda corriente no sinusoidal.

Normalmente estas fuentes de alimentación, cuentan con un puente rectificador de diodos con un filtro por capacitor que es el que demanda una corriente no sinusoidal (Fig. 1 y 2). Este tipo de fuente de alimentación se utiliza comúnmente en distintas aplicaciones; en hornos de microondas, impresoras

láser, instrumentación médica, televisores, y la iluminación electrónica entre otros. El problema con las cargas no lineales, es la forma de onda no sinusoidal de la corriente que inyecta armónicos a la red eléctrica y que a su vez producen perturbaciones en el resto de los equipos conectados.

### Factor de Potencia

La Corrección del Factor de Potencia (PFC) es necesaria para la transformación de AC a DC. El PFC reduce los armónicos en la línea de corriente, incrementando la eficiencia y la capacidad de los sistemas de potencia, reduciendo los costos. Con el desarrollo de técnicas digitales, más algoritmos de control son implementados en los circuitos de electrónica de potencia con ayuda

de operación de un convertidor tipo flyback con sus ventajas e inconvenientes, dado que este circuito puede ser utilizado tanto en la etapa de conversión y regulación como en la etapa de corrección de factor de potencia. La figura 3 muestra el circuito básico de un convertidor flyback donde pueden notarse los elementos básicos del circuito, y sus diferencias en comparación a una fuente convencional lineal. A continuación se describen los componentes del convertidor y sus características.

**Tensión de entrada continua (VDC):** mientras que en una fuente convencional se parte de una fuente de voltaje primario de alta tensión de tipo alterno, en una fuente flyback esta tensión debe ser de tipo continuo (aunque no necesariamente regulada). Esto implica

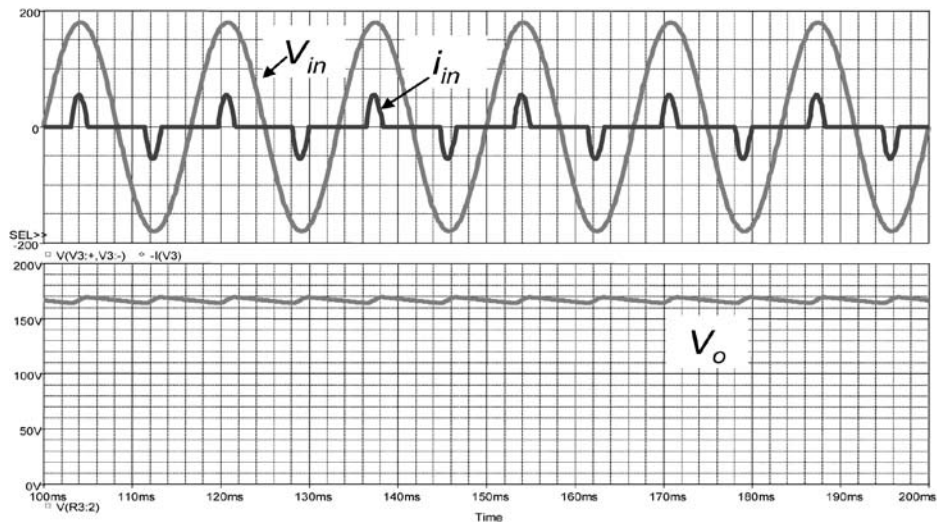


Figura 2. Arriba: voltaje sinusoidal de entrada y corriente no sinusoidal, abajo : voltaje de salida

de chips digitales, microprocesadores, DSPs o FPGAs [18]. Una de las razones es que con el control digital se pueden implementar algoritmos más complejos de control. Otra de las razones del uso del control digital es la ventaja sobre el control analógico, incluyendo la programación, la adaptabilidad, reduce el número de partes y es menos vulnerable a las variaciones. Un convertidor flyback en modo de conducción discontinuo (MCD) en lazo abierto, se comporta como una resistencia efectiva de carga a su entrada de potencia. Debido a lo anterior, se puede sustituir por un rectificador corrector del factor de potencia económico para equipos de oficina.

### Convertidor Flyback

Para entender cualquier fuente de conmutación de conversión directa desde tensión de línea es imprescindible entender las características básicas

que en un convertidor AC/DC, previo al flyback debe existir un circuito rectificador que genere esta alta tensión desde la fuente alterna primaria.

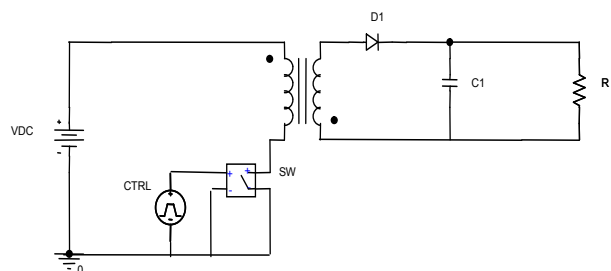


Figura 3. Convertidor conmutado flyback

**Elemento de control (SW):** mientras que en una fuente convencional alterna la frecuencia esta definida y es fija (50Hz-60Hz), en una fuente flyback existe un interruptor que conmuta a muy alta frecuencia (de

40kHz a 100kHz) y con un ciclo de trabajo variable. Incluso, esta frecuencia no es necesariamente fija, y puede ser disminuida en ciertas situaciones de bajo consumo.

**Inductor con dos devanados:** en una fuente convencional se usa un transformador en el que se trata que circule una corriente alterna de valor medio cero para evitar la magnetización, y donde se realiza una transferencia continua de energía del primario al secundario; en cambio, en una fuente flyback el principio de operación es distinto: mientras el interruptor está ON circula por el bobinado primario de un inductor una corriente creciente, almacenando energía en forma de campo magnético en el núcleo y sin transferir dicha energía al secundario; al abrirse el interruptor (OFF) es cuando se induce en el secundario una tensión del valor necesario para que esta energía sea transferida a ese circuito. Es decir, en una fuente flyback la transferencia de energía es discontinua, y se realiza mediante paquetes de energía magnética que son “cargados” en el núcleo a través del devanado primario, para ser luego transferidos al secundario.

**Rectificador en el circuito secundario (D1):** en una fuente conmutada flyback este rectificador solo conduce en parte del ciclo OFF del convertidor, desde el momento en que éste se abre hasta que se agota la energía magnética almacenada en el núcleo. El capacitor de filtro (C1) en el secundario debe mantener el suministro de energía a la carga hasta el próximo ciclo, y dado que la frecuencia de conmutación es muy alta, este capacitor suele ser de bajo valor, siendo ahora de importancia su baja inductancia y resistencia.

**Circuito de control (CTRL):** la diferencia con una fuente convencional es total. En una fuente convencional el regulador es un circuito lineal, opera en el secundario, y controla la tensión de salida absorbiendo la diferencia de tensión entrada/salida, disipando potencia. En cambio en una fuente flyback el circuito de control es ON/OFF y controla la tensión de salida regulando la energía que se transfiere mediante cambios en el ciclo de trabajo (y a veces la frecuencia) del interruptor.

### Convertidor flyback multifase

Bastantes son los autores que han estudiado a los convertidores multifase para distintas aplicaciones [12]-[17]. La mayoría de los trabajos desarrollados lo hacen para aplicaciones en convertidores CC-CC [13]-[17]. Algunos autores utilizan el concepto de multifase para aplicaciones vehiculares de fuentes bi-direccionales con buses de baterías que van de 12V a 42V que es la nueva tensión de alimentación para la tecnología automotriz [15]. En [16] se propone la utilización de

cuatro convertidores basados en la topología reductora para alimentar a los microcontroladores, sin embargo, esta topología no puede ser utilizada para corrección del factor de potencia debido a que con tensión de entrada cero, la salida también es cero y no es de utilidad para esta aplicación. Uno de los autores del estado del arte propone la utilización del convertidor elevador empleando la técnica de multifase para corrección del factor de potencia [12]. El autor utiliza dos convertidores elevadores para lograr tener un bus de alta tensión a partir de estos dos convertidores desfasados 180° en el tiempo. Sin embargo, al tratarse de una tensión muy elevada, no resulta atractiva para las aplicaciones que en este trabajo se persiguen dado que se piensa en aplicaciones de equipos de mediana potencia que emplean tensiones que van de 5V,  $\pm 12V$ , 24V y 48V a partir de la red eléctrica. Lo anterior provoca que la topología elevadora sea una mala candidata para este tipo de aplicaciones. Además de que la topología elevadora no presenta aislamiento eléctrico entre la entrada y la salida del convertidor. Otro problema que tiene la topología elevadora, es que incluso ante una falla, abrir el interruptor de control no garantiza que deje de presentarse voltaje a la salida del convertidor debido a que la tensión de entrada se coloca a la salida a través de la bobina y el diodo del convertidor sin control alguno.

El convertidor flyback multifase como su nombre lo indica, es una variante respecto a un único convertidor flyback. Este convertidor tiene la característica de colocar varios convertidores flyback en paralelo para conseguir distribuir las pérdidas de conducción, mejorar la respuesta dinámica, aumentar la frecuencia en el capacitor de salida y con esto disminuir su tamaño para poder obtener mayor escalamiento de potencia. La figura 4 muestra el aspecto del circuito de un convertidor flyback multifase con cuatro convertidores (4 fases). Todos los convertidores comparten la misma tensión de entrada y el mismo capacitor de salida. Cada uno tiene por separado su transformador o bobinas acopladas y su respectivo diodo. La etapa de control normalmente se desarrolla con controladores digitales que permiten la generación y variación de los pulsos de control de una manera más sencilla frente a alternativas analógicas. Los pulsos de control del convertidor multifase están desfasados en el tiempo de tal manera que los cuatro convertidores absorben energía de la entrada en tiempos distintos para ser transferida también de esta manera. En la figura 5 se muestran los disparos de control del convertidor flyback multifase de 4 fases.

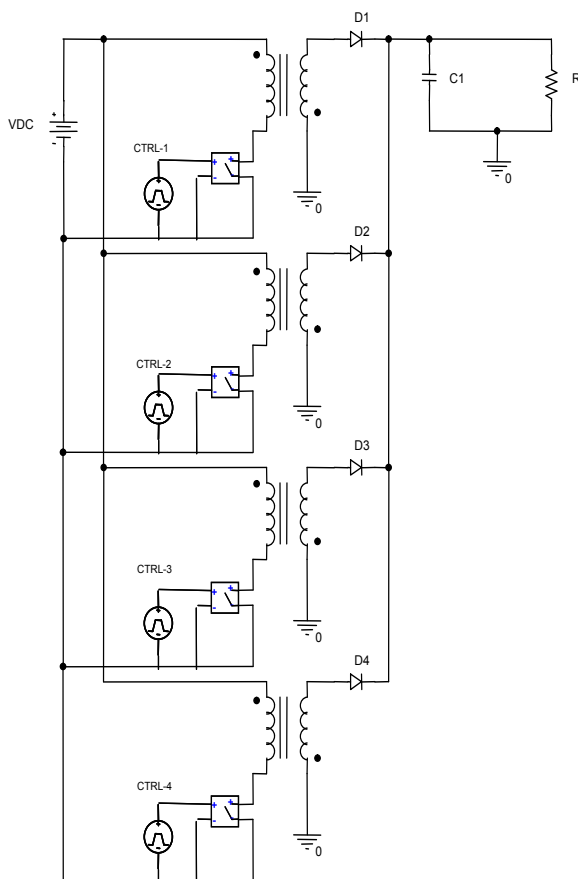


Figura 4. Convertidor flyback multifase

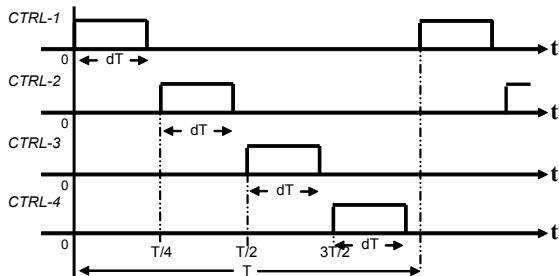


Figura 5. Señales de control

### Simulación

Para el desarrollo de este trabajo y poder hacer una comparativa entre distintas combinaciones de convertidores multifase frente un único convertidor, se realizaron múltiples simulaciones variando principalmente la relación de transformación en el convertidor único y en los convertidores multifase. En la figura 6 se presenta la topología del convertidor flyback construido en una única etapa para su simulación. En la figura 4 se presenta el arreglo de cuatro convertidores flyback para conformar el convertidor multifase en la simulación. Para la simulación del convertidor

multifase, se ha utilizado la versión libre de PSPICE 8.0. Esta versión de evaluación ha sido suficiente por la cantidad de nodos que se utilizan, ya que se puede simular cualquier circuito eléctrico que no exceda determinado número de conexiones proporcionando resultados satisfactorios.

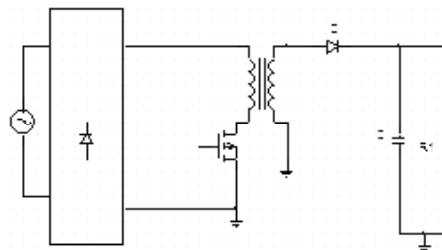


Figura 6. Topología Flyback de un único convertidor para simular.

Normalmente, la elección del número de fases para un convertidor, se encuentra determinado por las características de rizado de la corriente de salida, complejidad del control, límite de potencia en cada fase o por el costo de las mismas. La técnica de multifase se aplica perfectamente desde la utilización de dos convertidores como lo es el caso de [12], aunque en la literatura se han encontrado convertidores con 2, 4, 8, 16 y hasta 32 fases de acuerdo a la potencia y la aplicación [16]. En el caso del convertidor para este proyecto, se ha fijado como referencia de comparación un único convertidor de potencia de 400W. A partir de este dato y de que el convertidor flyback es mejor desarrollarlo para potencias no mayores de 150W [1]-[2], se ha seleccionado como numero inicial de comparación un convertidor de cuatro fases, es decir, colocar cuatro convertidores flyback de 100W c/u en paralelo para compararlos con un único convertidor de 400W. En base a lo anterior, se realizan ocho simulaciones, cuatro corresponden a un único convertidor flyback de 400W con relaciones de transformación 1, 2, 3 y 4 y las otras cuatro simulaciones corresponden al convertidor multifase (N = 4) con relaciones de transformación también de 1, 2, 3 y 4 para poder ser comparadas entre si. Los datos con los que se realizaron las 8 simulaciones se muestran en la Tabla I.

TABLA I ESPECIFICACIONES DE SIMULACION

Voltaje de entrada CA	127V
Voltaje de salida CD	48V
Potencia de salida	400W
Frecuencia de conmutación	100kHz
Relación de transformación (n)	1, 2, 3 y 4
No. de fases para el convertidor multifase (N)	4

## Resultados

Al realizar la simulación en SPICE se obtienen resultados que muestran el buen comportamiento del convertidor multifase frente a una única etapa de convertidor. En las figuras 7 y 8 se muestran las formas de onda del voltaje de salida y corriente de entrada en ambos convertidores. La magnitud de corriente que se obtiene en el convertidor formado por un único convertidor es 4 veces mayor que la corriente demandada en el convertidor multifase. Con la corriente en el convertidor multifase, se tienden a reducir las pérdidas por conducción y calentamiento con las cuales deben estar operando de manera continua los componentes, evitando el desgaste por calentamiento y pérdidas en la conmutación. Otra mejora encontrada en el convertidor multifase frente a una única etapa de convertidor, es la reducción de las componentes armónicas que se presentan en la corriente de la fuente lo cual favorece en el diseño de los filtros de entrada (Figuras 7 y 8). Obsérvese de la Figura 7, que en las cuatro simulaciones para el convertidor, la corriente de entrada es senoidal pero con alto contenido armónico en los múltiplos de la frecuencia de conmutación. También se aprecia una disminución de la corriente de pico que se presenta en la forma de onda senoidal conforme se aumenta la relación de transformación en el transformador ( $n$ ). Esto es una consecuencia natural de acuerdo al principio de operación del convertidor flyback [1].

En los cuatro casos del único convertidor flyback, la corriente es discontinua y se comprueba porque en todas las simulaciones la forma de onda de la corriente llega siempre hasta el valor de cero. Obsérvese de la Figura 8 que también en la configuración del convertidor flyback multifase presenta disminución de la corriente con el aumento de la relación de transformación, sin embargo, el espectro armónico de la corriente presenta muchas menos componentes armónicas, de menor amplitud y se presentan en la frecuencia que se obtiene por las cuatro fases de convertidores con las que se presenta el convertidor flyback multifase, es decir, a partir de 400kHz (0.4MHz).

## Conclusiones

Se realizó una búsqueda del estado del arte correspondiente a la corrección del factor de potencia en convertidores de una sola etapa. Se seleccionó una topología de convertidor para ser analizada como convertidor multifase y determinar las ventajas y/o desventajas que ofrece esta topología para ser implementada como convertidor multifase. La topología que se seleccionó como idónea para el análisis

y estudio fue la del convertidor flyback en modo de conducción discontinuo debido a que se trata de una topología de convertidor que se comporta de manera natural como un convertidor emulador de resistencia. Simulaciones de cada uno de los convertidores tanto únicos como convertidores multifase para relaciones de transformación distintas fueron llevadas a cabo con éxito en SPICE para las cuales se pudo verificar la tendencia en la mejora de las corrientes y la forma de onda senoidal.

Basado en los resultados obtenidos por las simulaciones, es factible realizar físicamente los convertidores y obtener resultados favorables que ayuden a justificar el uso de convertidores flyback multifase para el caso de demanda de potencias variables de 0 a 400W y esperar mejoras en el rendimiento.

## Agradecimientos

Este trabajo de investigación es realizado y financiado bajo el proyecto PIINF07-1 de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.



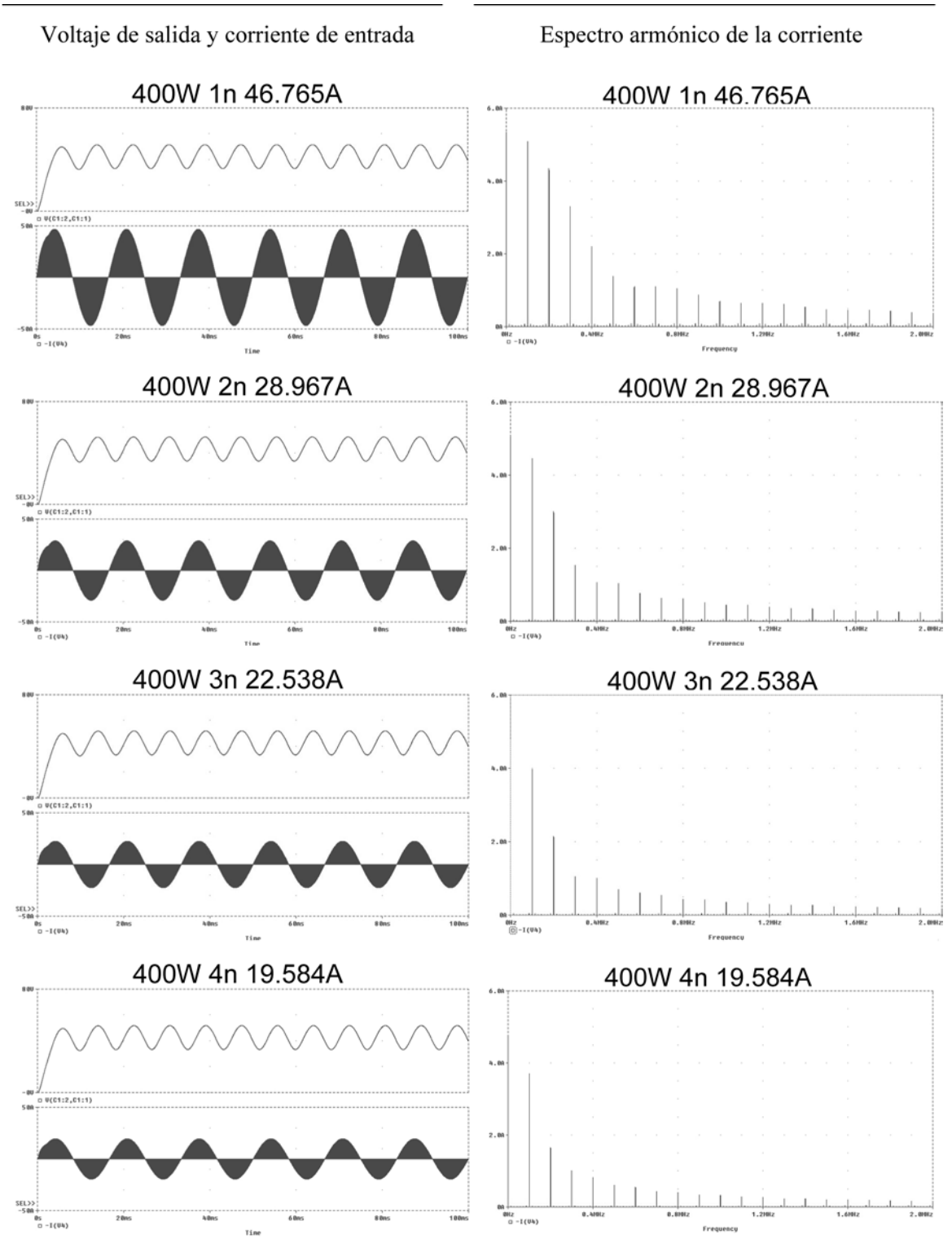


Figura 7. Voltaje de salida, corriente de entrada y espectro armónico para un único convertidor

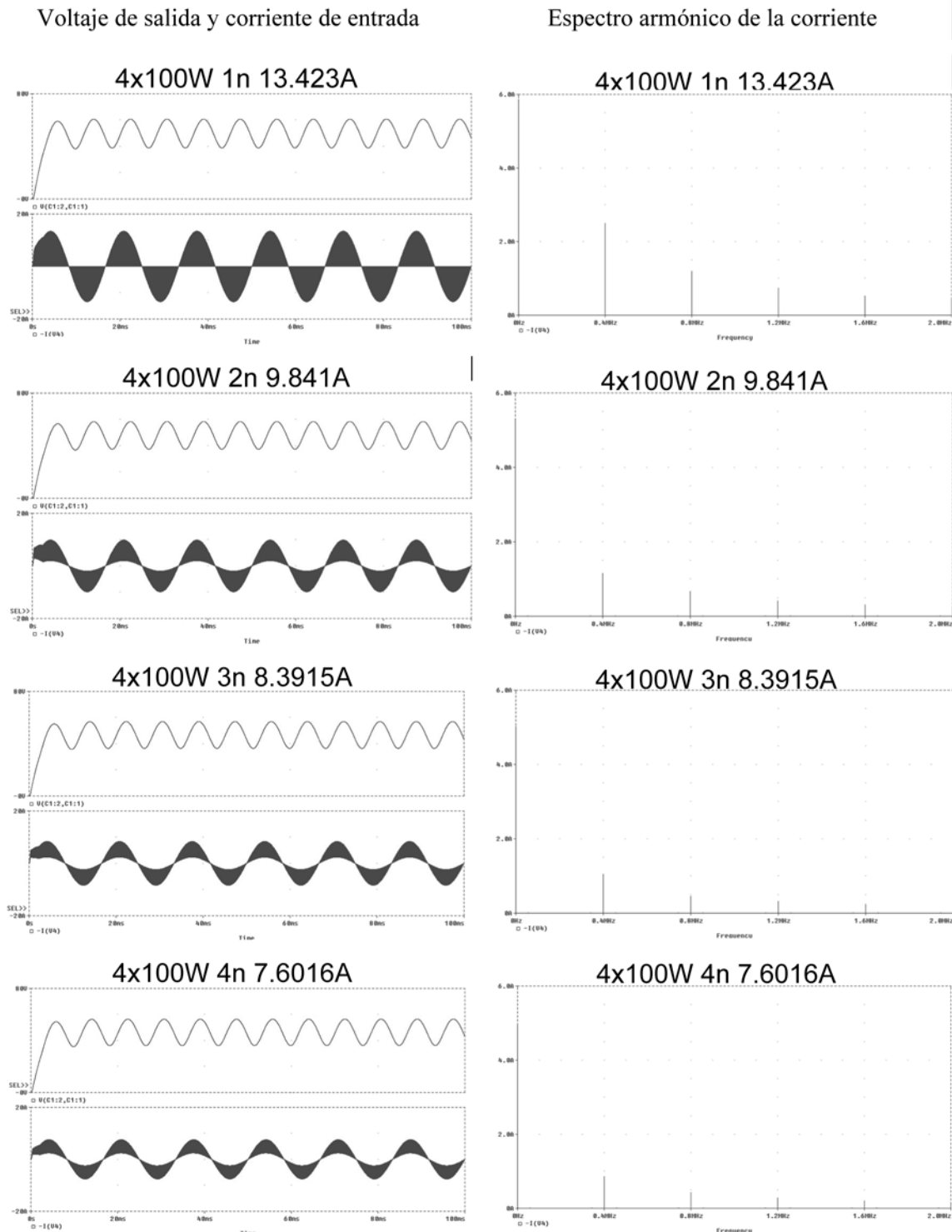


Figura 8. Voltaje de salida, corriente de entrada y espectro armónico para un convertidor multifase

## Referencias

- [1] R. Erickson, M. Madigan, and S. Singer, "Design of a simple high power factor rectifier based on the flyback converter," in *Proc. IEEE Applied. Power Electron. Conf. (APEC)*, 1990, pp. 792–801.
- [2] M. Madigan, R. Erickson, and E. Ismail, "Integrated high quality rectifier regulators," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (PESC)*, 1992, pp. 1043–1051.
- [3] Wang, D.H.; Cheng, K.W.E.; "General discussion on energy saving"; Power Electronics Systems and Applications, 2004. Proceedings. 2004 First International Conference on 9-11 Nov. 2004 Page(s):298 – 30
- [4] Hwei, P. Hsu. "Análisis de Fourier"; Wilmington, Delaware, U.S.A. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. 1987
- [5] Heydt, G.T.; Hoffman, S.P.; Risal, A.; Sasaki, R.I.; Kemper, M.J.; "The impact of energy saving technologies on electric distribution system power quality"; Industrial Electronics, 1994. Symposium Proceedings, ISIE '94., 1994 IEEE International Symposium on 25-27 May 1994 Page(s):176 – 181
- [6] García O. "*Soluciones avanzadas para la corrección activa del factor de potencia en fuentes de alimentación monofásicas de baja potencia*", Universidad Politécnica de Madrid, Tesis doctoral, Octubre 1999
- [7] Sutopo, B.; Widjaya, S.F.D.; "Energy saving algorithm on induction motors controlled by a 68HC11 microcontroller system using fuzzy logic approaching"; *Power Electronics and Drive Systems*, 2001. Proceedings., 2001 Volume 1, 22-25 Oct. 2001 Page(s):59 - 61 vol.1
- [8] Song Jiancheng; Li Haiying; Hao Junfang; Zhai Shengqin; Xie Hengkun; "Study on electricity saving fuzzy controller of asynchronous motors based on fuzzy logic", *Electrical Machines and Systems*, 2001. ICEMS 2001. Volume 2, 18-20 Aug. 2001 Page(s):774 – 777 vol.2
- [9] Rezek, A.J.J.; Coelho, C.A.D.; Cortez, J.A.; Vicente, J.M.E.; Abreu, J.P.G.; Ramos, C.D.; Megalhaes, C.; Da Silva, V.F.; "Energy conservation with use of "soft-starter"; Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on Volume 1, 1-4 Oct. 2000 Page(s):354 - 359 vol.1
- [10] Kaiser, W.; Chabu, I.E.; Lourenco, E.A.C.; "Design of a hybrid ballast with magnetic shunts: application to control of HID lamps"; Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE Volume 3, 5-9 Oct. 1997 Page(s):2270 - 2275 vol.3
- [11] Cobos, J.A.; Garcia, O.; Uceda, J.; Sebastian, J.; Martinez, A.; Arau, J. "Compact AC/DC converter with low output voltage (3.3 V) and power factor correction"; Power Electronics Congress, 1995. Technical Proceedings. CIEP 95., IV IEEE International, 1995 Page(s): 8 -13C
- [12] Brett A., David M., Schlecht F.; "High efficiency power factor correction using interleaving techniques", APEC 1992, page(s) 557- 568
- [13] Garcia, O.; Zumel, P.; de Castro, A.; Cobos, J.A.; "Effect of the Tolerances in Multi-Phase DC-DC Converters" Power Electronics Specialists, 2005 IEEE 36th Conference on June 12, 2005 Page(s):1452 – 1457
- [14] Zumel, P., Garcia, O.; Cobos, J.A.; Uceda, J.; "Tight magnetic coupling in multiphase interleaved converters based on simple transformers"; Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE Volume 1, 6-10 March 2005 Page(s):385 - 391 Vol. 1
- [15] Garcia, O.; Zumel, P.; de Castro, A.; Cobos, J.A.; Uceda, J.; "An automotive 16 phases DC-DC converter" Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual Volume 1, 20-25 June 2004 Page(s):350 – 355 Vol.1 Digital Object Identifier 10.1109/PESC.2004.1355769
- [16] Oliver, J.A.; Zumel, P.; Garcia, O.; Cobos, J.A.; Uceda, J.; "Passive component analysis in interleaved buck converters" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE Volume 1, 2004 Page(s):623 - 628 Vol.1 Digital Object Identifier 10.1109/APEC.2004.1295871
- [17] Alou, P.; Cobos, A.; Garcia, O.; Prieto, R.; Uceda, J.; "Input voltage influence on voltage regulator modules based on multiphase buck and multiphase half bridge topologies", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE Volume 2, 2004 Page(s):1282 - 1288 vol.2 Digital Object Identifier 10.1109/APEC.2004.1295988
- [18] De Castro, A.; Zumel, P.; Garcia, O.; Riesgo, T.; Uceda, J.; "Concurrent and simple digital controller of an AC/DC converter with power factor correction based on an FPGA"; Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 18, Issue 1, Part 2, Jan. 2003 Page(s):334 - 343

**Artículo recibido:** 7 de noviembre de 2008

**Aceptado para publicación:** 26 de noviembre 2008