

# Diseño y simulación mediante Simplorer® de un convertidor Boost corrector del factor de potencia

Por Eladio Durán Aranda, Manuel Gómez Gómez y Jorge Rubio Aral

Departamento de Ing. —  
Electrónica, de Sistemas  
Informáticos y Automá-  
tica de la Universidad de  
Huelva.  
Escuela Politécnica —  
Superior, Ctra. Palos de  
la Frontera s/n. 21071.  
Huelva.  
E-mail: aranda@uhu.es,  
manuel.gomez@diesia.  
uhu.es

*En este trabajo, presentamos fundamentalmente, el empleo de Simplorer® como herramienta de simulación de sistemas electrónicos de Potencia; concretamente se realiza la implementación y simulación de un sistema corrector del factor de potencia (PFC) basado en un convertidor elevador (Boost), el cual emplea un esquema de control en modo corriente y en modo tensión.*

Simplorer® V7 ha sido desarrollado para diseñar y analizar complejos sistemas. Los modelos de simulación creados con Simplorer® pueden contener circuitos con diferentes dominios físicos, bloques y estructuras de modelos de máquinas de estados, modelados mediante SML (Simplorer Modeling Language) o VHDL-AMS (Very high-speed integrated Hardware Description Language-Analog Mixed Signal).

Su potente interface gráfica, facilita la implementación de complejos modelos. Siendo una de sus características más sobresaliente, el empleo de rápidos y estables algoritmos de simulación, los cuales reducen el tiempo de simulación y proporcionan resultados precisos.

Todas las herramientas usadas para modelar, simular y analizar se encuentran integradas dentro de Simplorer Simulation Center (SSC). El SSC gestiona el inicio de los programas, administra los archivos del proyecto, y habilita los sistemas para la simulación y el entorno de programación. Simplorer® ejecuta cálculos para modelos de simulación descritos en VHDL-AMS. El SML inicia automáticamente la compilación en el simulador VHDL-AMS si los componentes VHDL-AMS son usados en el modelo de simulación. Los componentes habituales para simulación VHDL-AMS están disponibles en las pestañas emergentes AMS, Tools y Digital del ModelAgent. [1]

En la dirección Web: <http://www.ansoft.com>, puede encontrarse una versión de evaluación de Simplorer®.

## Corrección del factor de potencia

El mal comportamiento frente a la red de los sistemas electrónicos y el consumo de armónicos de intensidad, provoca la degradación del factor de potencia. Tomando como base un rectificador monofásico en puente con carga resistiva y filtro capacitivo, realizaremos una corrección del factor de potencia sobre este simple ejemplo de carga no lineal. El rectificador junto con el filtro capacitivo presentan frente a la red, un comportamiento típicamente no lineal, aunque no por esto menos empleado, ya que se utiliza en cualquier aplicación donde sea necesaria una conversión CA-CC, como en alimentación de motores de CC, y fuentes de alimentación (lineales y conmutadas). Para mejorar dicho factor de potencia, el acoplamiento de la carga al rectificador, se realiza mediante un convertidor CC-CC elevador (Boost), tal y como se muestra en la figura 1.

Se consigue un elevado factor de potencia si se hace conmutar al MOSFET de forma que la intensidad de entrada sea prácticamente senoidal y en fase con la tensión de la red. Un control en modo de corriente hace que la señal de referencia para la intensidad por la inductancia sea un seno rectificado, ya que se obtiene del producto de una señal con forma de onda senoidal, y una señal constante que representa el error de tensión de salida, como se observa en la figura 2. Con esto se consigue, además, que la intensidad de referencia sea proporcional al error de tensión de salida.

En cuanto a los valores de los componentes pasivos del convertidor, estos dependen de la potencia que manejen y del rizado de intensidad o tensión en los mismos [2]. El valor de la inductancia viene dado por la ecuación 1, para las condiciones de intensidad de entrada más desfavorables, es decir, para la menor tensión eficaz de entrada:

$$L = \frac{V_m \sqrt{2} \cdot \delta}{\Delta I \cdot f_s} \quad (1)$$

Figura 1: Esquema básico de un PFC mediante convertidor Boost.

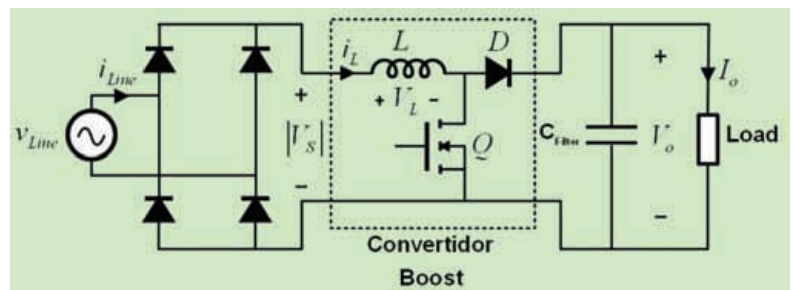
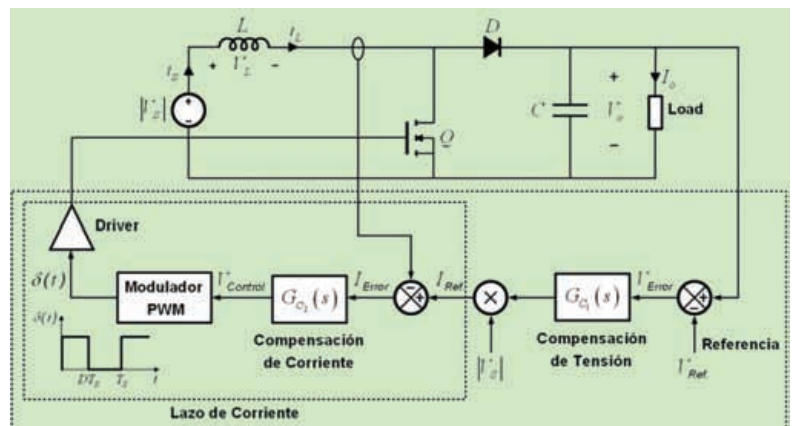


Figura 2: Lazo de control para la corrección del factor de potencia.



En esta ecuación  $V_{in}$  es la tensión eficaz de entrada,  $\delta$  es el ciclo de servicio,  $\Delta t$  es el rizado de intensidad y  $f_s$  es la frecuencia de conmutación. En aplicaciones con tensiones de entrada senoidales el valor del ciclo de servicio viene dado por:

$$\delta = \frac{V_o - V_m \sqrt{2}}{V_o} \quad (2)$$

El valor del condensador necesario puede ser calculado a partir de la ecuación 3.

$$C = \frac{2 \cdot P_o \cdot \Delta t}{V_o^2 - V_{o,min}^2} \quad (3)$$

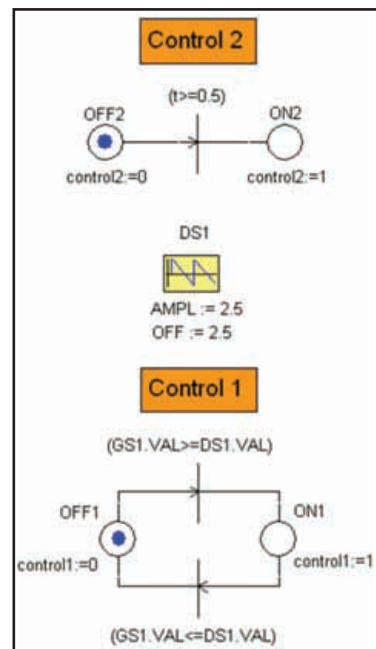
En esta ecuación  $P_o$  es la potencia de salida del sistema,  $\Delta t$  es el tiempo de mantenimiento de carga,  $V_o$  es la tensión de salida y  $V_{o,min}$  es la mínima tensión permitida a la salida, que coincide con la máxima tensión presente en la entrada del convertidor, ya que esta topología no permite una tensión de salida menor que la de entrada.

### Implementación del convertidor CC-CC con Simplorer®

La implementación realizada esta compuesta de cuatro partes. La primera esta formada por la etapa de potencia y alimentación (figura 3). El interruptor Ts1 nos permite simular el circuito para las dos condiciones más desfavorables y está controlado por la red Control 2. La etapa rectificadora esta compuesta por un puente rectificador y un filtro. El ciclo de servicio del MOSFET esta controlado por la red Control 1.

La segunda etapa esta compuesta por el sistema de control del interruptor Ts1 y del MOSFET (figura 4). De modo que el interruptor tomará

en principio como fuente de tensión E1, y al cabo de 0.5 segundos pasará a tomar los valores de la fuente de alimentación E2 hasta el final de la simulación. Control 1 se encarga de la conmutación del MOSFET de modo que establece un control del ciclo de servicio en función de la señal de control GS1 y de la salida de la etapa de control del MOSFET.



La etapa de control del MOSFET (figura 5) esta compuesta por un sistema automático de control rea-

limentado y esta diseñado mediante dos redes PID, una para el control de tensión y otra para la intensidad. Donde  $V_s$  es la entrada del seno de referencia que se toma del voltímetro VM1,  $V_{ref}$  es una señal constante de 400V,  $V_o$  la tensión en la resistencia de carga RC e  $I_L$  la intensidad por el inductor.  $G_{pvs}$ ,  $G_{pis}$  y  $GS1$  son los bloques de las funciones de transferencia del PID de tensión, intensidad y el bloque del filtro respectivamente.

El apartado de medidas está compuesto por un conjunto de bloques que se encarga de calcular el factor de potencia, realizando el cociente entre la potencia activa y la aparente, y dos bloques que se encargan de calcular el valor máximo y mínimo de la tensión de salida del convertidor.

### Implementación del sistema de control

En cuanto a los parámetros que conforman los compensadores, el valor de la ganancia proporcional del lazo de intensidad debe cumplir la ecuación 4.

$$K_{PI} = \frac{V_{osc} \cdot f_s \cdot L}{V_o} \quad (4)$$

Donde  $V_{osc}$  es el valor máximo de la rampa estabilizante. Con esto se consigue que la máxima pen-

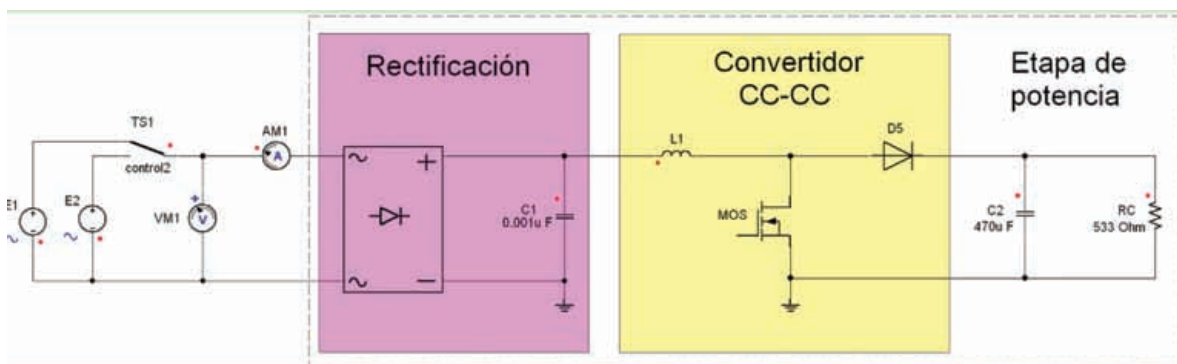
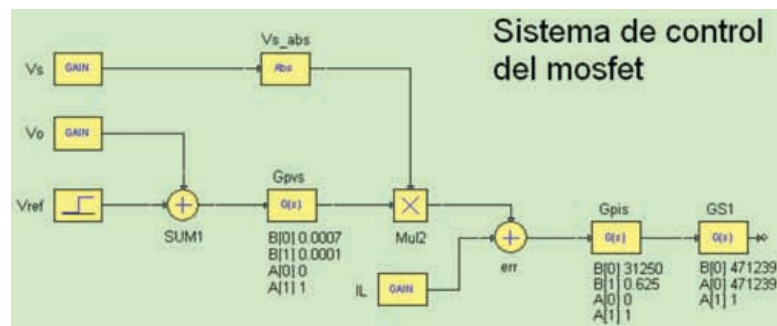


Figura 4. Etapas de Control 1 y Control 2.

Figura 5. Sistema de control del MOSFET.

Figura 3: Etapa de potencia y alimentación.

Figura 7. Ventana de parámetros de simulación.

diente descendente de intensidad en la inductancia, se haga igual a la pendiente de la rampa estabilizante, condición necesaria para la estabilidad del sistema [3]. Por otro lado, el valor de la ganancia integral del lazo de intensidad se calcula de modo que provoque un suficiente margen de fase. Para ello se puede considerar que la función de transferencia del sistema a compensar tiene la forma dada en la ecuación 5.

$$G(s) = \frac{V_o}{V_{osc} \cdot L \cdot s} \quad (5)$$

Por otro lado, el filtro paso-bajo del compensador del lazo de intensidad debe introducir un polo a una frecuencia ligeramente superior a la frecuencia de conmutación, con la finalidad de filtrar las señales de alta frecuencia. Los valores del compensador del lazo de tensión deben hacer que el rizado de tensión presente en el condensador de salida, sea muy bajo en el lazo de control, eligiendo para ello un valor de ganancia proporcional pequeño, de lo contrario distorsionaría la señal de referencia de la intensidad por la inductancia. En el valor de la ganancia integral debe introducirse un cero a frecuencias bajas (del orden del Hz), consiguiéndose así un margen de fase aceptable.

### Especificaciones para el PFC y parámetros de simulación

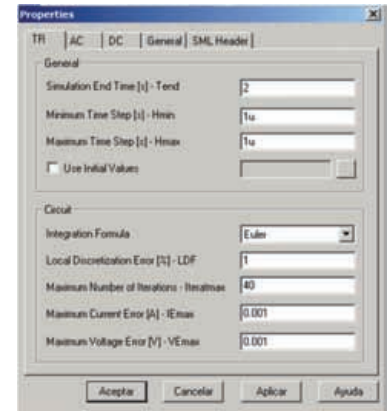
Se simula un sistema corrector del factor de potencia con las siguientes especificaciones:

- Potencia de salida de 300 W.
- Frecuencia de red de 47 a 65 Hz.
- Frecuencia de conmutación 50Khz.
- Rizado de intensidad comprendido entre un 20 y un 30%.

Esto requiere un convertidor con una inductancia de 1mH y un condensador de 470 µF. Las condiciones de la simulación serán las más desfavorables. Estas son:

- 1º- Una tensión de red de 100 V, frecuencia de 47 Hz, resistencia de carga de 300 W, que provocan el máximo rizado de tensión a la salida y el mayor consumo de intensidad.
- 2º- Tensión de red de 240 V, frecuencia de red a 65 Hz, resistencia de carga de 300 W, que provocan el mínimo rizado de intensidad en la bobina y un peor factor de potencia.

Se realizará un análisis transitorio con un tiempo final de 2 segundos, lo cual permite observar la evolución de la tensión de salida, teniendo en cuenta los cambios producidos en las condiciones de entrada. Los parámetros de simulación se muestran en la figura 7. Para observar con mayor rapidez el



valor que adquiere el factor de potencia, en Vomax y Vomín, podemos optar por incluir unas condiciones iniciales de simulación partiendo de un régimen permanente del circuito. Las condiciones iniciales pueden ser establecidas en cualquier instante de la simulación en el que se observe que se ha estabilizado la señal de salida, mediante:

Simulator dialogs => Save Inicial Values

con lo que se generara un archivo de condiciones iniciales del tipo:

nombre\_hoja.awsv

y que puede ser cargado habilitando el uso de condiciones iniciales en la ventana de parámetros de simulación.

En las siguientes figuras se pueden observar los resultados de la simulación obtenidos del sistema PFC:

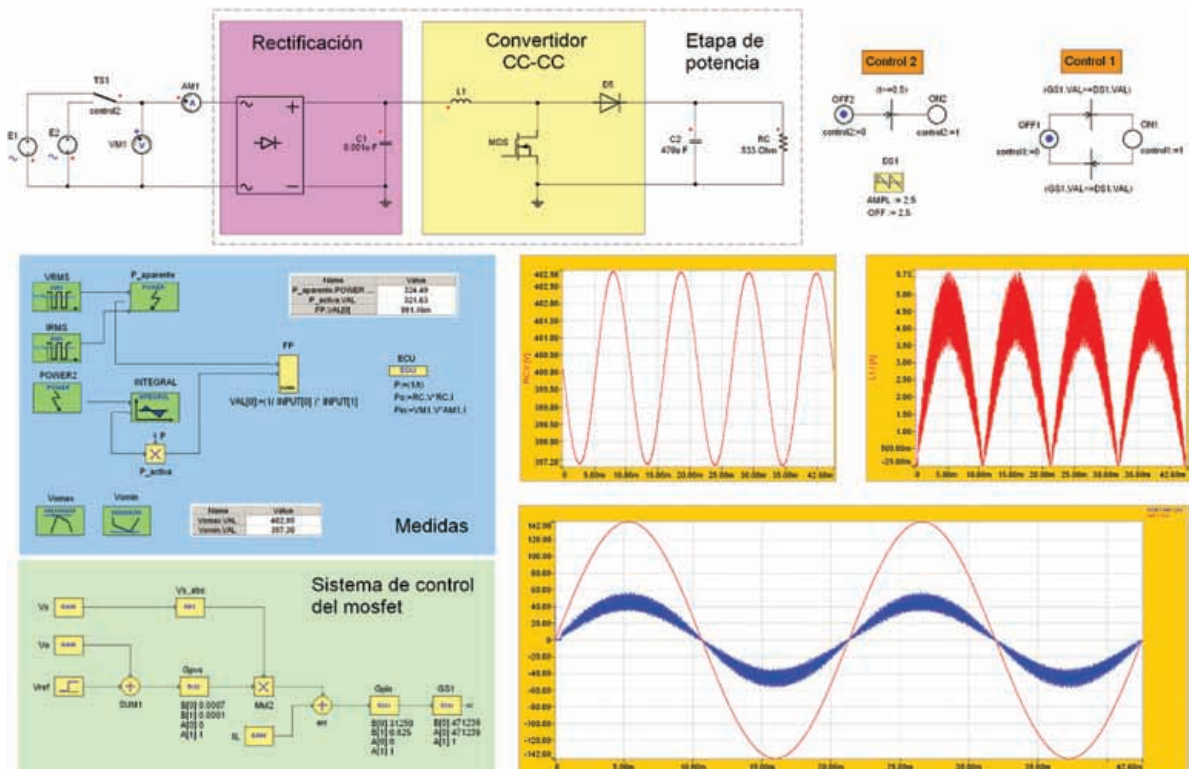


Figura 8. Pantalla de simulación final en Simplorer Schematic del circuito PFC.

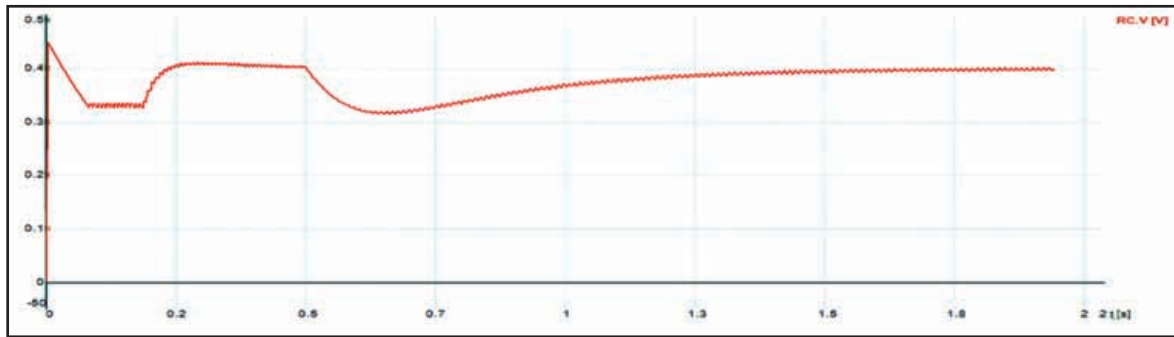


Figura 9. Formas de onda para una entrada de 240V-65Hz ( $0 < t < 0.5$ ) y 100V-47Hz ( $0.5 < t < 2$ ).

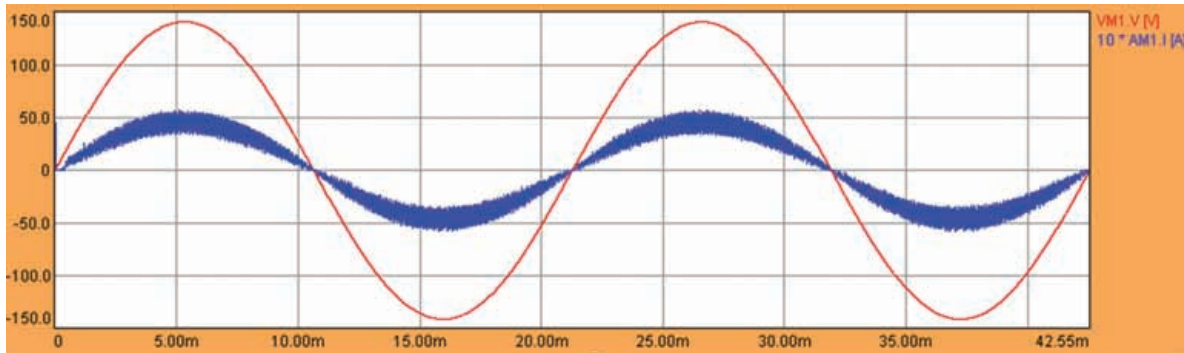


Figura 10. Representación de la tensión e intensidad de entrada para  $V_i=100V-47Hz$ .

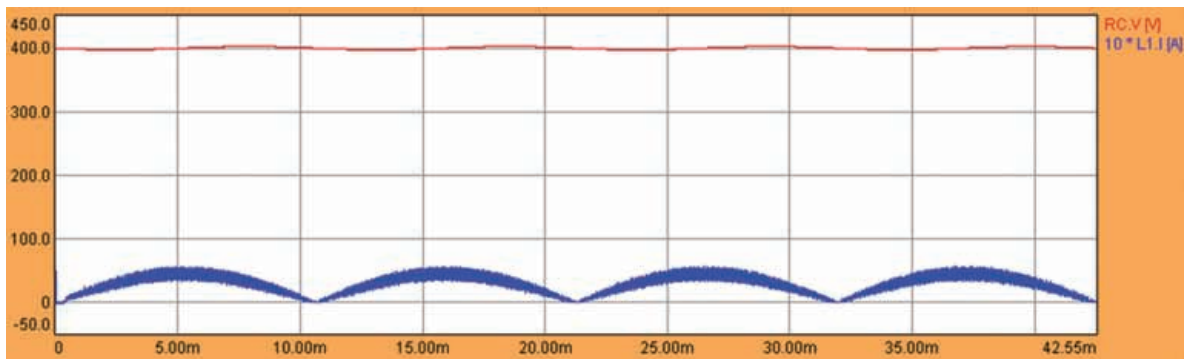


Figura 11. Representación de la tensión en la carga y la tensión en el inductor para  $V_i=100V-47Hz$ .

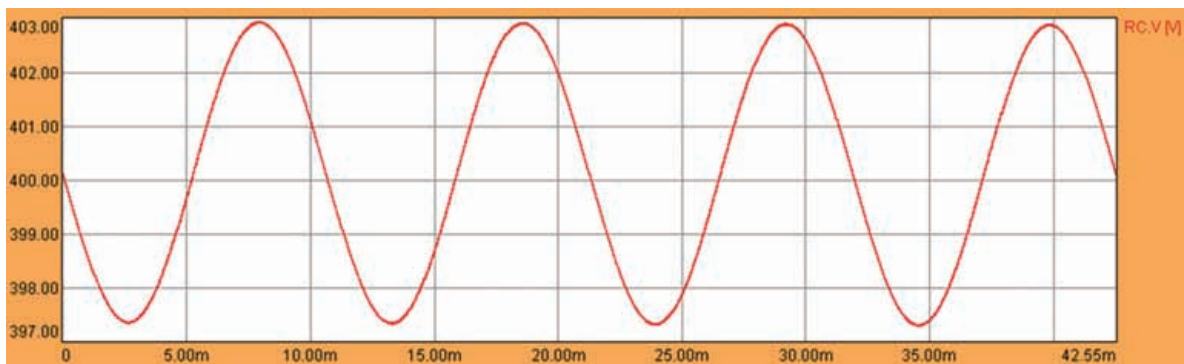


Figura 12. Rizado de tensión en la carga para una  $V_i$  de 100v-47Hz.

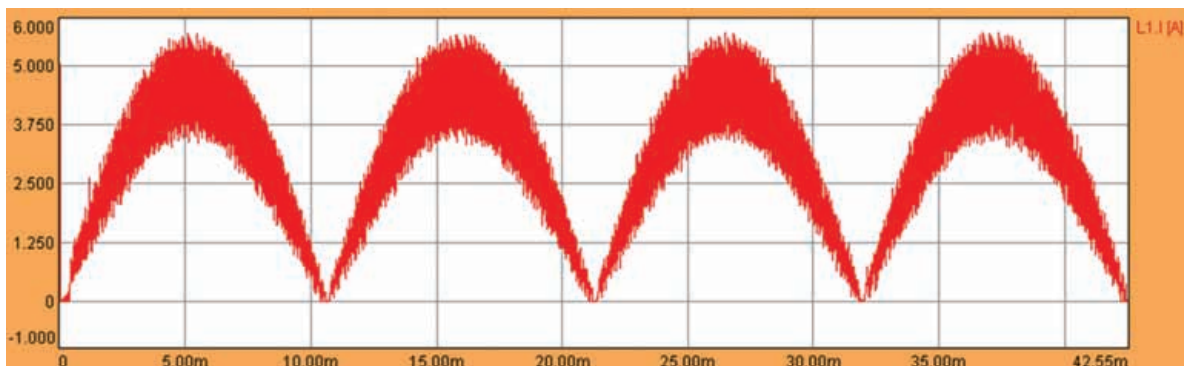


Figura 13. Representación de la intensidad en el inductor para  $V_i=100V-47Hz$ .

Figura 14. Representación de la tensión e intensidad de entrada para  $V_i=240V-65Hz$ .

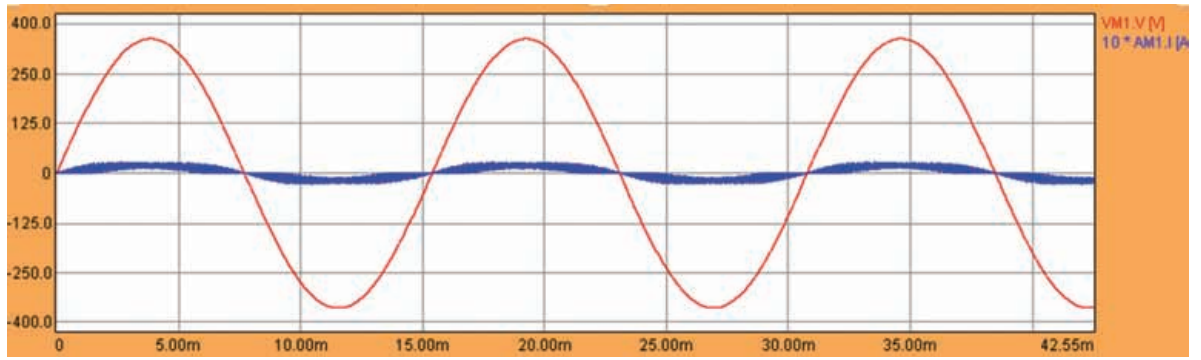


Figura 15. Representación de la intensidad en el inductor para  $V_i=240V-65Hz$ .

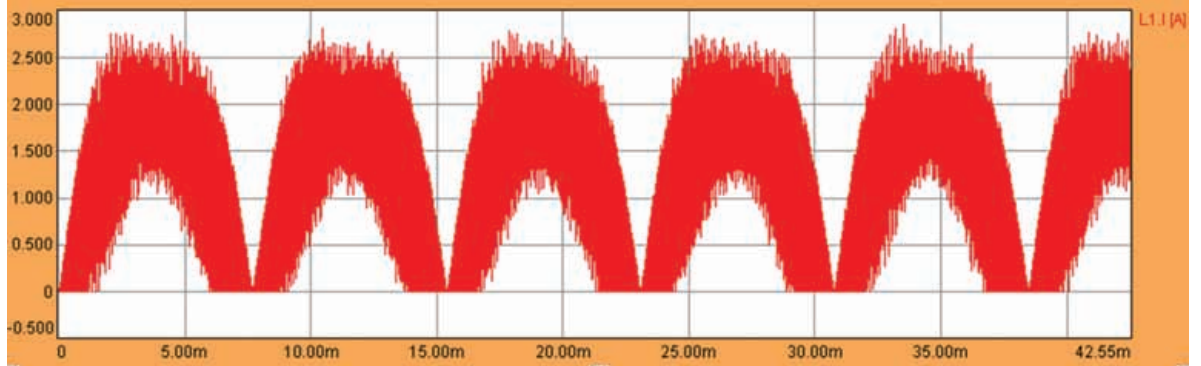


Figura 16. Representación de la tensión en la carga y la intensidad en el inductor para  $V_i=240V-65Hz$ .

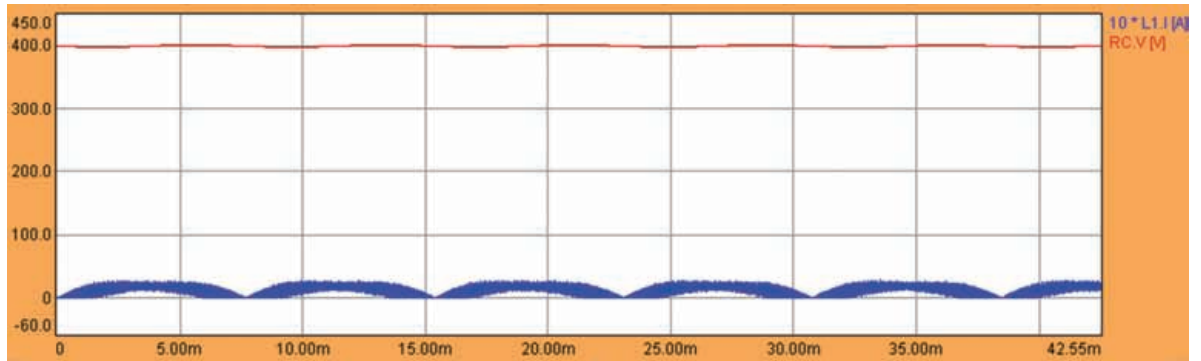


Figura 17. Rizado de tensión en la carga para  $V_i$  de 240V-65Hz.

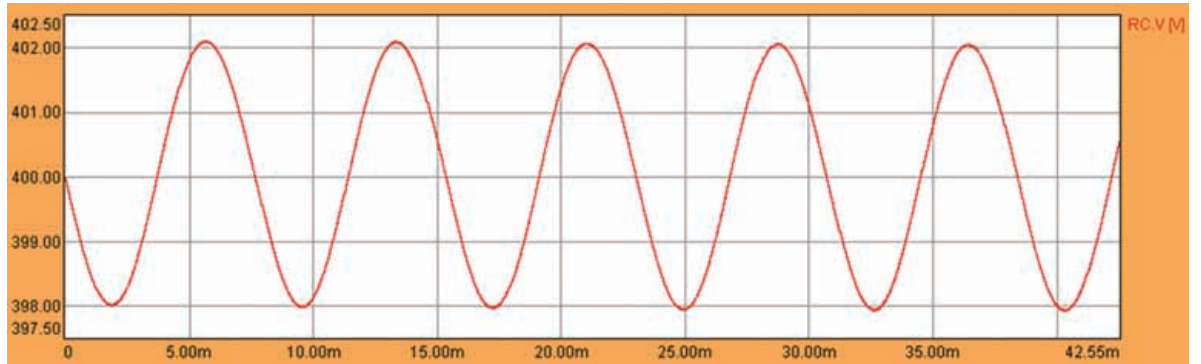
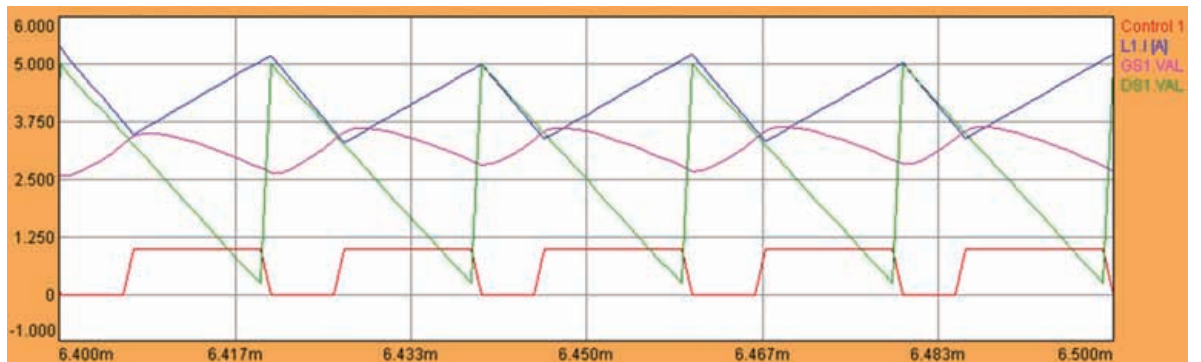


Figura 18. Control de ciclo de servicio para  $V_i$  de 100V-47Hz.




FP.VAL[0]	991.16m
-----------	---------

FP.VAL[0]	946.64m
-----------	---------

### Conclusiones

El uso de Simplorer para la simulación de circuitos de potencia proporciona resultados correctos, y nos permite la interacción entre circuitos electrónicos, diagramas de

bloques y máquinas de estado de una manera muy sencilla e intuitiva, por lo tanto es un programa muy adecuado tanto para iniciarnos en el diseño y simulación de circuitos electrónicos como para realizar proyectos a nivel industrial. 

### Referencias

- [1] Manual SIMPLORER The Multi Domain Simulator V6 y V7.
- [2] Eladio Durán Aranda y Alberto González Jesús, Diseño y simulación con Power System Blockset de un convertidor Boost corrector del factor de potencia, Revista Española de Electrónica, Nº 564, 2001.
- [3] S. Martínez García y J.A. Gualda Gil, Electrónica de Potencia. Componentes, Topologías y Equipos Thomson Parainfo, págs. 58a 68, 2006.

Figura 19. Valor del factor de potencia para  $V_i=100V-47Hz$  (mejor F.P.).

Figura 20. Valor del factor de potencia para  $V_i=240V-65Hz$ .

## NUESTRA PORTADA

# Tektronix completa su familia de osciloscopios MSO y DPO con el lanzamiento de la nueva serie de osciloscopios con canales mixtos MSO3000.

Con el lanzamiento de la serie MSO3000, Tektronix ha completado su familia de osciloscopios DPO/MSO de bajo y medio coste. Los usuarios de osciloscopios podrán elegir ahora entre 24 modelos correspondientes a las series homogéneas en cuanto a características y manejo: DPO2000, DPO3000, DPO4000 (sin canales digitales) y MSO2000, MSO3000, MSO4000 (con 16 canales digitales).

La nueva serie MSO3000 proporciona al diseñador de sistemas embebidos la capacidad de visualizar y analizar señales analógicas, digitales y de buses serie con un único instrumento. La serie ofrece una combinación equilibrada entre el precio y las prestaciones, hasta cuatro canales analógicos y 16 canales digitales, anchos de banda de 100, 300 y 500 MHz, 5M de longitud de registro en cada canal y una velocidad de muestreo en tiempo real de 2,5Gs/s en cada canal. Con la adición de esta nueva serie a la familia de MSOs/DPOs líder en la industria, Tektronix ofrece ahora una gama completa de posibilidades desde 100MHz a 1GHz permitiendo a los ingenieros de diseño simplificar y acelerar la depuración de los complejos sistemas embebidos. Estos osciloscopios se pueden adquirir a través de ESSA y AFC INGENIEROS S.A.

Si desea ampliar esta información puede obtenerla visitando la Web de Tektronix, [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)



Completando la Familia  
Serie MSO3000

Series MSO2000, MSO3000 y MSO4000

- 12 Modelos de Osciloscopios
- 16 Canales Digitales
- 100, 200, 300, 350, 500 y 1000 MHz
- SPI, I2C, LIN, CAN, FlexRay, RS232, RS422, RS485, UART, I2S, LJ, RJ, TDM
- FPGAs, Video, Fuentes Conmutadas, Medidas de Potencia y Armónicos, ...

Tektronix