

Diseño de una Fuente de Alimentación de Dos Etapas: AC-DC con Corrección de Factor de Potencia y DC-DC con un Convertidor Director (Forward Converter) e Implementación de su Etapa AC-DC

Aldo Alava ⁽¹⁾, Hernán Campos ⁽²⁾, Síxifo Falcones ⁽³⁾
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación ⁽¹⁾
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
agalava@espol.edu.ec ⁽¹⁾, hcampos@espol.edu.ec ⁽²⁾, sixifo@espol.edu.ec ⁽³⁾

Resumen

El presente documento muestra el diseño de una fuente de conmutación de dos etapas, la primera de un circuito para la corrección del factor de potencia basado en un convertidor Boost y la segunda etapa de un circuito aislado basado en un convertidor Forward para la obtención de un voltaje de salida DC con rizados en corriente y voltaje bajos. El objetivo principal es estudiar el funcionamiento de las fuentes de conmutación y estar en la capacidad de diseñarlas e implementarlas. El diseño se divide en dos partes: el la etapa de fuerza y la etapa de control. La etapa de fuerza se enfoca en los parámetros de voltajes y corrientes que la fuente maneja en su entrada y salida, mientras que la etapa de control se enfoca en el comportamiento de la salida ante los cambios y perturbaciones que pueda tener la entrada. La técnica utilizada para el diseño de la parte de control es el Método del Factor K que nos permite hallar polos y ceros para un margen de fase y frecuencia de corte dado; las dos etapas utilizan un controlador para el voltaje y uno para la corriente.

Palabras Claves: Fuente de conmutación, Corrección del Factor de Potencia, Convertidor Boost, Convertidor Forward, Método del factor K.

Abstract

This document shows the design of a switching mode power supply with two stages, the first stage is a circuit for power factor correction based on a boost converter and the second stage of an isolated converter circuit based on a Forward converter to obtain a DC output with low voltage and current ripples. The main objective is about to analyze the operation of switching-mode power supplies and be able to design and implement them. The design is divided into two parts: power and control stage. The power stage focuses on the parameters of voltage and current that the source handles as input and output, while the control stage design focuses on the behavior of the output according changes and perturbations it could get. The technique used in the design the control stage is the K Factor Method that allows us to find poles and zeros for a phase margin and crossover frequency given; the two stages use its respective controller for voltage and current.

Keywords: Switching Power Supply, Power Factor Correction, Boost Converter, Forward Converter, K Factor Method.

1. Introducción

Podemos definir fuente de alimentación como aparato electrónico modificador de la electricidad que convierte la tensión alterna en una tensión continua. Remontándonos un poco en la historia describiremos que en la industria no se contaba con equipos eléctricos, luego se empezaron a introducir dispositivos eléctricos no muy sofisticados por lo que no eran muy sensibles a sobretensiones, luego llegaron los equipo más modernos que necesitaban de bajos voltajes y por lo tanto eran muy sensibles a sobretensiones, cambios bruscos o ruido en las tensiones de alimentación por lo que se ha iniciado la construcción de fuentes de alimentación que proporcionaran el voltaje suficiente de estos dispositivos y que garanticen la estabilidad de la tensión que ingresa al equipo, motivo por el cual se necesita estudiar el funcionamiento de las fuentes de alimentación conmutadas, las cuales cumplen con los requerimientos antes mencionados desde hace ya varias décadas y que en la actualidad todo dispositivo electrónico (computadoras, teléfonos celulares inteligentes, etc) hace uso de este tipo de fuentes, aunque de mayor complejidad debido a las exigencias ahora requeridas, se mantiene el esquema principal de su funcionamiento. [1]

2. Fundamento Teórico

2.1. Factor de Potencia (PF)

El factor de potencia es simplemente la relación que existe entre la potencia real y la potencia aparente, en otras palabras:

$$PF = \frac{\text{Potencia real}}{\text{Potencia aparente}} \quad (1)$$

2.2. Fuentes de Conmutación y PFC

Se la utiliza en las fuentes de conmutación por la presencia de impedancia no lineal en la red eléctrica.

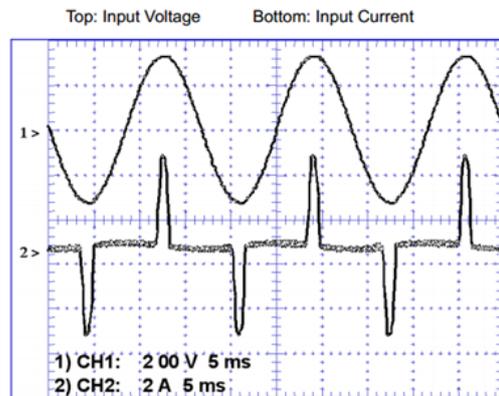


Figura 1. Señales de voltaje y corriente de entrada de un circuito rectificador de onda completa. Fuente: [4]

Nótese que el voltaje y la corriente están perfectamente en fase, a pesar de la grave distorsión de la forma de la onda actual. Aplicando la fórmula de coseno del ángulo de fase, tendríamos la errónea conclusión de que dicha fuente tiene un factor de potencia de 1.0. Tenemos que hacer un análisis de las frecuencias armónicas y con esto nos damos cuenta del valor real del factor de potencia, una solución a este problema es reducir dichas armónicas y quedarnos solo con la frecuencia referencial, con esto se logra alcanzar verdaderamente un factor de potencia unitario. [2]

La figura 2 muestra la entrada de una fuente de alimentación con corrección del factor de potencia unitario. Tiene una forma de onda de corriente que imita la forma de onda de voltaje, tanto en forma como en fase. Tenga en cuenta que sus corrientes armónicas de entrada son casi cero. [5]

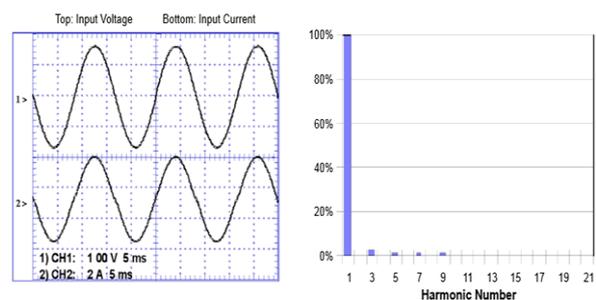


Figura 2. Fuente de entrada con corrección del factor de potencia. Fuente: [4]

2.3 Convertidor Boost

Es un tipo de convertidor DC a DC cuya característica a destacar es que presenta a su salida un voltaje mayor al de la entrada y por supuesto una menor corriente. [6]

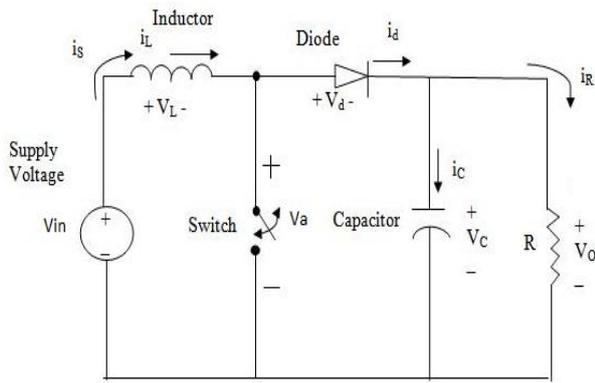


Figura 3. Diagrama Esquemático de un Convertidor Boost. Fuente: [6]

2.4. Topología del Convertidor Boost Aplicada en el PFC

La topología del Convertidor Boost se usa para lograr una corrección del factor de potencia activa, es fácil de implementar y funciona como etapa pre-reguladora de voltaje (previa a la etapa reguladora dc-dc). [7]

2.5. Convertidor Forward

El convertidor Forward es un convertidor DC-DC que utiliza un transformador para incrementar o reducir el voltaje de salida (dependiendo de la relación de vueltas del transformador) y proporcionar de aislamiento galvánico a la carga. [8]

El aislamiento galvánico es frecuentemente colocado entre las tierras de la fuente y la carga para mayor seguridad y protección al suministrar energía a la carga aislada.

Estas razones hacen del convertidor Forward en una alternativa aceptable en consideración a necesidades de gestión de energía.[9]

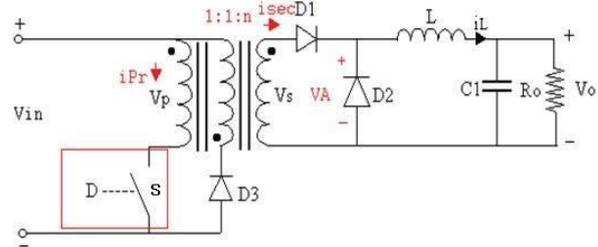


Figura 4. Análisis inicial del convertidor Forward.

3. Diseño de los circuitos de fuerza

3.1. Parámetros y Requerimientos del Convertidor Boost

Para el dimensionamiento de dicho PFC, consideramos los siguientes valores como requerimientos de diseño:

Voltaje de línea de entrada (V_{in}): 120 Vrms

Potencia máxima (P_{max}): 400 W

Frecuencia de conmutación (f_{sw}) = 65KHz

Factor de Potencia (PF): 0.99

Eficiencia (η): 92%

Voltaje de Salida (V_{out}): 200 Vdc

3.2. Dimensionamiento de los Componentes del Convertidor Boost del PFC

A continuación se presenta el esquema del circuito a utilizar y los correspondientes valores para los principales elementos.

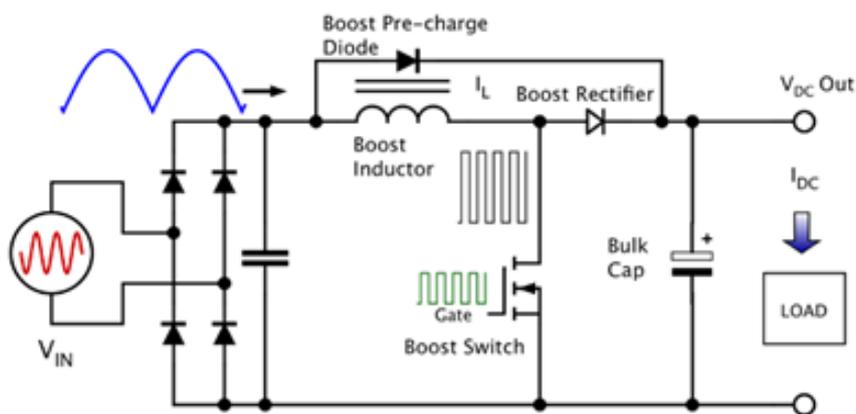


Figura 5. Bloque esquemático de un PFC usando topología de un convertidor Boost. Fuente: [8]

Puente rectificador:

$$P_{PUENTE} = 7.9 W \quad (2)$$

Capacitor de entrada:

$$C_{in} = 0.084 \mu F \quad (3)$$

Inductor Boost:

$$L_{BOOST} = 2.477 mH \quad (4)$$

Switch (Mosfet):

$$P_{conduccion} = 1.087 W \quad (5)$$

Capacitor de salida (Bulk Cap):

$$C_{out} = 2000 \mu F \quad (6)$$

3.3. Prueba de funcionamiento del Convertidor Boost en Simulink de Matlab

En la siguiente figura se aprecian tres gráficas, la primera muestra el voltaje de salida del PFC y el voltaje de entrada rectificado, la segunda gráfica muestra la corriente del inductor Boost, la corriente de salida del PFC y la corriente del entrada del circuito, la tercera gráfica muestra el ciclo de trabajo empleado.

Como se observa, debido a que el circuito funciona a lazo abierto no se ha logrado un factor de potencia unitario.

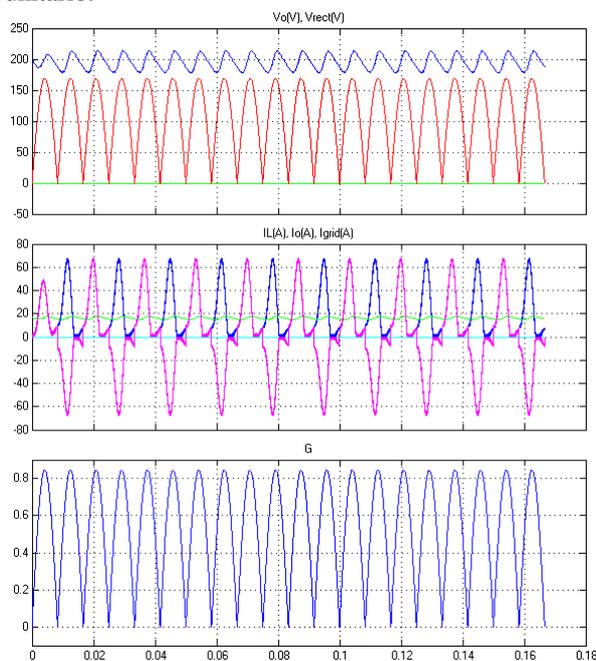


Figura 6. Mediciones de voltaje, corriente y ciclo de trabajo del convertidor Boost en simulink.

3.4. Esquemático y Requerimientos del Convertidor Forward

La figura 4 muestra el esquema básico de un convertidor Forward en lazo abierto que consta de un transformador de tres bobinas, un inductor de salida L, una capacitancia de salida C₁, un switch D, diodos D₁, D₂ y D₃ y la carga R₀ que asumimos que es resistiva.

A continuación se plantean los requerimientos de funcionamiento del convertidor Forward:

Potencia máxima de entrada: 200W

Potencia máxima de salida: 160W

Voltaje de entrada (Voltaje de salida del PFC): 200V

Voltaje de salida: 25V

Frecuencia de conmutación: 500KHz

3.5. Dimensionamiento de los Componentes del Convertidor Forward

Relación de vueltas entre bobina primaria, reset y secundaria:

$$N_{prim} : N_{reset} : N_{sec} = 4 : 4 : 1 \quad (7)$$

Inductancia de magnetización del transformador:

$$L_{mag} = 35 \mu H \quad (8)$$

Inductor Forward:

$$L = 3.2 mH \quad (9)$$

Capacitor de salida:

$$C = 2.5 \mu F \quad (10)$$

3.6. Prueba de funcionamiento del Convertidor Forward en Simulink de Matlab

En la siguiente figura se aprecian cuatro gráficas, la primera muestra el voltaje de entrada y de salida del Convertidor Forward, la segunda gráfica muestra la corriente del inductor y la corriente de salida del Forward, la tercera gráfica muestra la corriente de magnetización del transformador que tiene un comportamiento periódico el cual era esperado y en la cuarta gráfica se observa el valor del ciclo de trabajo.

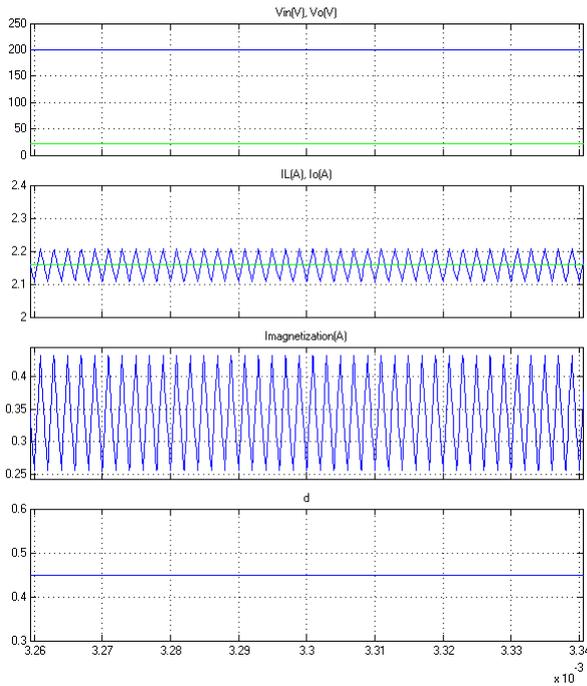


Figura 7. Mediciones de voltaje, corriente y ciclo de trabajo del Convertidor Forward en Simulink.

4. Diseño del Control de las dos etapas

En el capítulo 3 se observa la respuesta del Convertidor Boost con una entrada AC, y una salida DC. Con el diseño del control de voltaje y de corriente, se desea una salida con un factor de potencia unitario y una mejor respuesta en el tiempo.

Existen varias estrategias de control que se aplican a este tipo de circuitos, el método del factor K es uno de ellos y es el que se aplica en este proyecto.

4.1. Modelamiento de la Planta

Para diseñar los controladores primero se debe conocer la función de transferencia de la planta la cual se denomina ganancia de la planta o G_p y se muestran a continuación:

Tabla 1. Funciones de Transferencia o ganancias de planta.

Tipo de convertidor	Función de Transferencia
Convertidor Boost	$G_{p_1}(f) = \frac{M_3 V_{OUT}}{M_1 M_2 * 1\mu s} \frac{s(f)}{1 + \frac{s(f)}{2\pi f_{PWM_PS}}}$

Convertidor Forward	$G_{p_2}(s) = \frac{n \cdot V_i}{sI + R_i + \frac{R}{R_{sc} + 1}}$
---------------------	--

4.2. Cálculo de los Controladores por el Método del Factor K

En esta fuente de simulación se implementa el método del factor K para hallar los valores de los controladores de corriente y de voltaje.

Tabla 2. Tipos de controladores de acuerdo al método de aproximación del factor K.

Tipo I	Tipo II	Tipo III
$G_c = \frac{K_c}{s}$	$G_c = \frac{K_c (1 + \frac{s}{w_z})}{s (1 + \frac{s}{w_p})}$	$G_c = \frac{K_c (1 + \frac{s}{w_z})^2}{s (1 + \frac{s}{w_p})^2}$
	$w_z < w_p$	$w_z < w_p$

Controlador de Corriente del PFC:

$$G_{ci}(s) = \frac{1659.58}{s} \left[\frac{s + 1683.54}{s + 23448.16} \right] \quad (11)$$

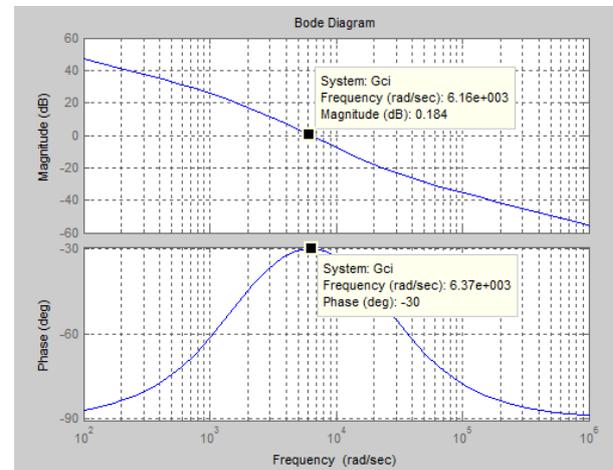


Figura 8. Diagrama de bode del controlador de corriente del PFC.

Controlador de Voltaje del PFC:

$$G_{cv}(s) = \frac{2344.23}{s} \left[\frac{s + 1683.54}{s + 23448.16} \right] \quad (12)$$

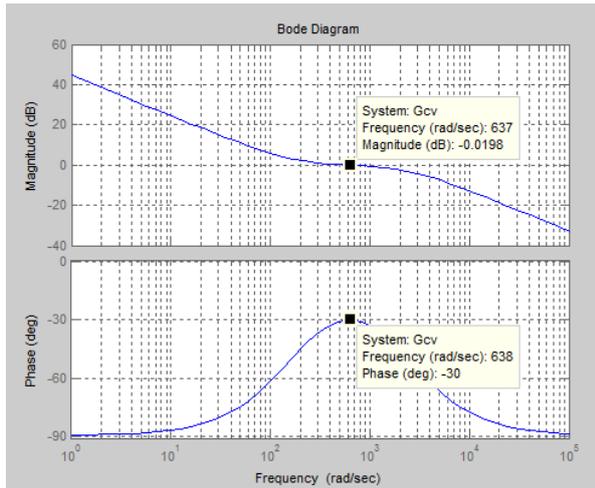


Figura 9. Diagrama de bode del controlador de voltaje del PFC.

Controlador de Corriente del Convertidor Forward:

$$G_{ci}(s) = \frac{0.1421s + 4362}{1.918e^{-5}s^2 + s} \quad (13)$$

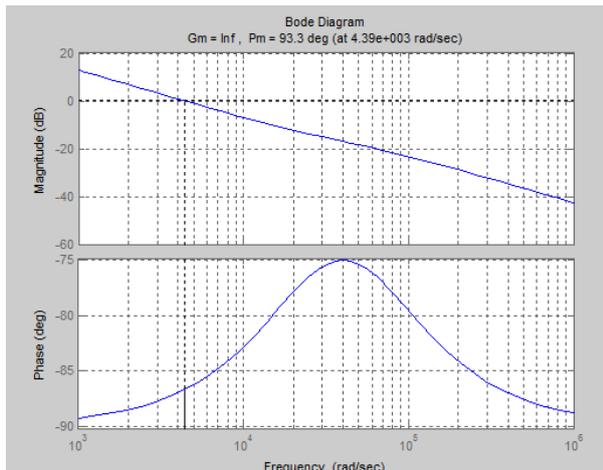


Figura 10. Diagrama de bode del controlador de corriente del Convertidor Forward.

Controlador de Voltaje del Convertidor Forward:

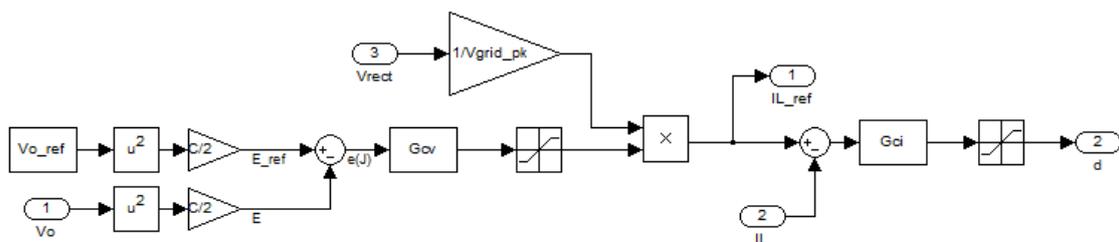


Figura 11. Diagrama de bloques del controlador del PFC.

$$G_{cv}(s) = \frac{402}{s} \quad (14)$$

4.3. Pruebas de funcionamiento del PFC en lazo cerrado en Simulink

En la figura 13 se aprecian las señales de voltaje, corriente y el ciclo de trabajo una vez que se encuentra funcionando el circuito en lazo cerrado con sus respectivos controladores.

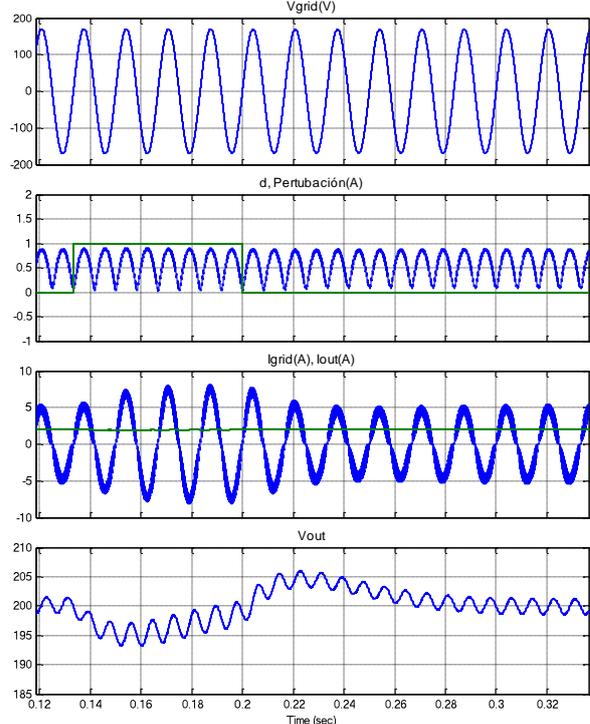


Figura 12. Señales de voltaje de salida, corriente de salida y el duty ratio a través del tiempo.

En la figura 13 se observan los valores de voltaje que ingresan al PFC y la salida de 200V. Además en la imagen se muestra una perturbación y la respuesta del sistema ante ella, el voltaje luego de 8ms recupera su forma y magnitud, adicionalmente se muestran que las corrientes y los voltajes están en fase entre sí y sin distorsión para alcanzar un factor de potencia unitario.

4.4. Pruebas de funcionamiento del Convertidor Forward en lazo cerrado en Simulink

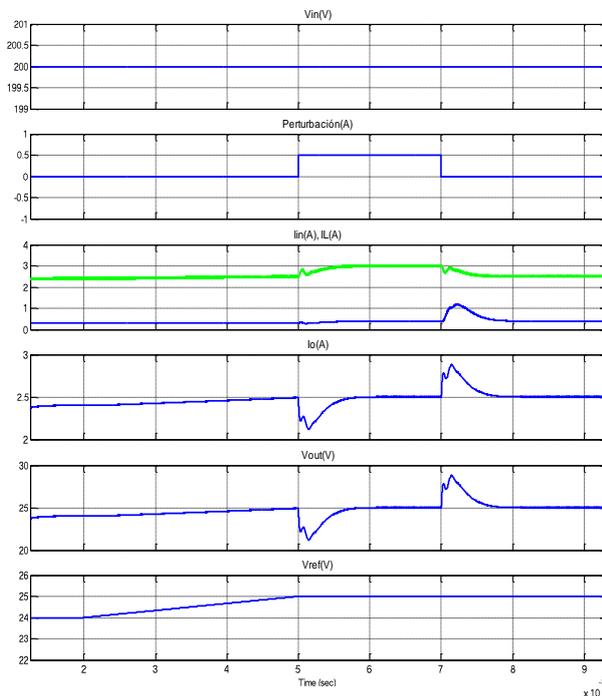


Figura 13. Señales de voltaje de salida, corriente de salida y el ciclo de trabajo a través del tiempo.

Se observan dos señales de voltaje, la primera es V_{in} o voltaje de entrada, la cual proviene del PFC y es de 200Vdc. La segunda es el voltaje de salida controlado, esta llega a su valor de 24 V (V_{ref}) en aproximadamente un milisegundo, lo cual se logra a partir del control del voltaje y de corriente en lazo cerrado con un rizado de voltaje del 0.1%.

También se observan las corrientes que fluyen a través del capacitor, el inductor y la resistencia de salida o carga, éstas muestran que llegan a su punto estable en aproximadamente 2 milisegundos. En el segundo cuadro se muestra un pulso de corriente que se ingresa para observar la reacción del sistema ante aquella perturbación. El voltaje genera un cambio brusco en su magnitud que se corrige en menos de un milisegundo debido al control de lazo cerrado del convertidor Forward. En el cuarto cuadro se muestra la corriente de salida que al igual que el voltaje sufre un cambio brusco debido a la perturbación, pero se corrige en menos de un milisegundo debido al control de lazo cerrado que se utiliza.

4.5. Ajuste de Valores para la Implementación Experimental del PFC

El controlador de lazo cerrado que se implementa físicamente es el propuesto por el circuito integrado UCC28019, el cual permite manipular parámetros

internos del mismo mediante la implementación de una red de compensación externa, la cual se diseña a partir de los requerimientos iniciales.

5. Análisis de Resultados

5.1. Resultados de la simulación

Las dos etapas que en capítulos anteriores se analizan (PFC y Convertidor Forward), se acoplan como un solo sistema para formar por completo una fuente de alimentación conmutada.

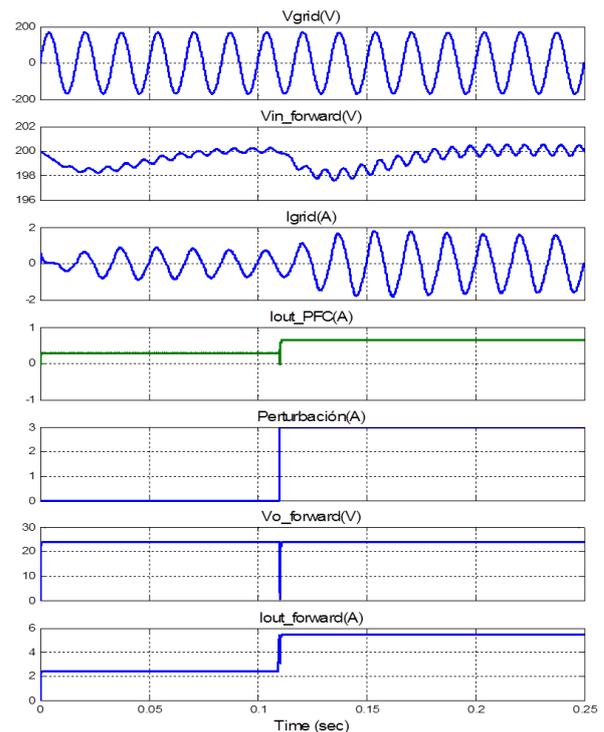


Figura 14. Señales de voltaje y corriente de entradas y salidas de la fuente conmutada diseñada.

La Figura 14 muestra siete gráficas correspondientes a las señales de voltaje y corriente de entrada y salida de las dos etapas acopladas. La primera gráfica corresponde al voltaje de entrada de línea V_{grid} . La segunda gráfica corresponde al voltaje de salida del PFC que a su vez es el voltaje de entrada del convertidor Forward. En esta gráfica se aprecia una señal de voltaje sinusoidal con una frecuencia de 120Hz, además mantiene un rizado en su voltaje de 2V correspondiente al 1% de su valor nominal. La tercera gráfica corresponde a la corriente de entrada de línea I_{grid} , que como se aprecia, está en fase con el voltaje de entrada. La cuarta gráfica muestra la corriente de entrada al convertidor Forward que en efecto debe ser una señal DC. La quinta gráfica muestra una señal escalón que corresponde a una fuente controlada de corriente conectada en paralelo a la resistencia de salida

del convertidor Forward para simular una perturbación al sistema y que se puede observar claramente cómo las demás señales, tanto de voltaje como de corriente, se comportan ante esta perturbación.

Por último se tienen las señales de voltaje y corriente de salida del convertidor Forward y la reacción que presentan ante la perturbación antes mencionada. Con los resultados obtenidos de la simulación con las dos etapas acopladas, se puede calcular la eficiencia total de la fuente conmutada:

$$P_{i_pfc_simulada} = V_{grid_rms} I_{grid_rms}$$

$$P_{i_pfc_simulada} = 63.64 W \quad (15)$$

$$P_{o_forward_simulada} = 57.6 W \quad (16)$$

$$\eta = \frac{P_{o_forward_simulada}}{P_{i_pfc_simulada}} \times 100\%$$

$$\eta = 90.51\% \quad (17)$$

5.2. Resultados reales de la implementación del PFC

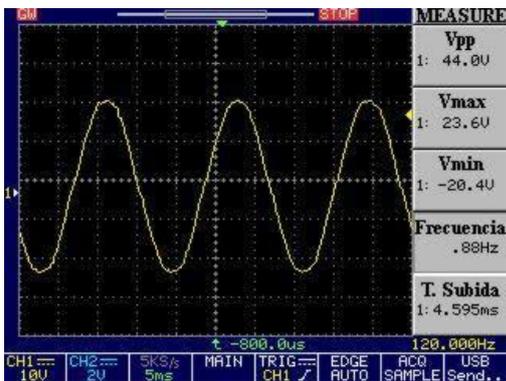


Figura 15. Voltaje de entrada del PFC medido por osciloscopio.

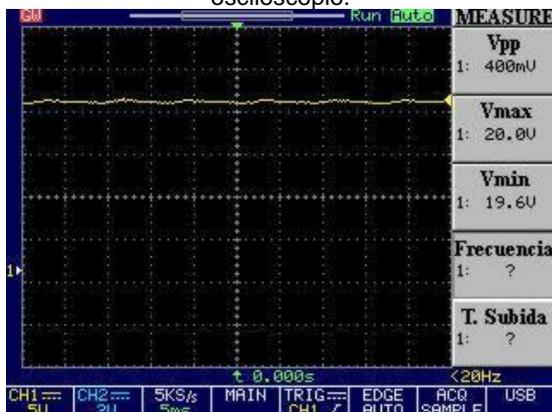


Figura 16. Voltaje de salida del PFC medido por osciloscopio.

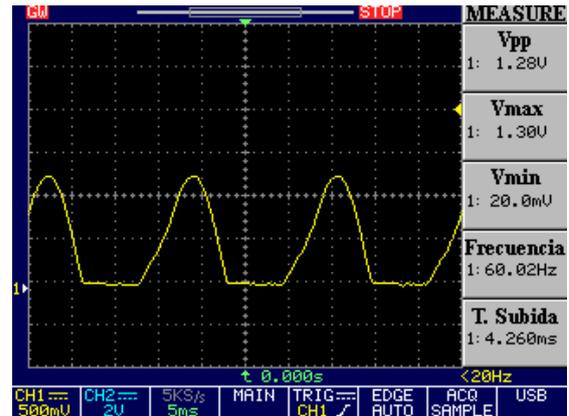


Figura 17. Forma de la señal de corriente de entrada del circuito medido por osciloscopio.

La figura 17 muestra una señal que corresponde al voltaje a través de una resistencia de prueba colocada en serie con la fuente de entrada utilizada para las pruebas físicas cuyo valor es de 14Vrms, de esta manera se puede obtener el valor de la corriente de entrada como se muestra a continuación en las siguientes ecuaciones:

$$I_{entrada_rms} = \frac{V_{PRUEBA_RMS}}{R_{PRUEBA}}$$

$$I_{entrada_rms} = 0.356 A \quad (18)$$

Como punto importante se tiene que el factor de potencia obtenido en las pruebas reales no es la unidad (valor que sí se obtuvo en las simulaciones), puesto a que la señal de la corriente de entrada no es una onda sinusoidal completa, esto se debe a que existen señales armónicas que no fueron corregidas por el circuito PFC.

Con los resultados obtenidos de las pruebas de la implementación de la etapa AC-DC, se puede calcular la eficiencia de la misma:

$$P_{i_pfc_prueba_real} = 4.928 W \quad (19)$$

$$P_{o_pfc_prueba_real} = \frac{V_{o_pfc_prueba_real}^2}{R_{prueba}}$$

$$P_{o_pfc_prueba_real} = 4 W \quad (20)$$

$$\eta_{real} = \frac{P_{o_pfc_prueba_real}}{P_{i_pfc_prueba_real}} \times 100\%$$

$$\eta = 81.17\% \quad (21)$$

6. Conclusiones

A través del análisis previo de los convertidores Boost y Forward, se procede a diseñar las etapas de la fuente de conmutación (AC-DC y DC-DC) bajo los requerimientos solicitados de potencia de salida, eficiencia, máximos porcentajes de rizado permitidos, factor de potencia unitario entre otros, que se detalla.

Se utiliza la técnica de control del factor k para diseñar los controladores de voltaje y corriente correspondientes a las etapas AC-DC y DC-DC, cuyos parámetros fundamentales de selección fueron el ancho de banda, la ubicación de los polos y ceros óptimos y el margen de fase deseado, y se obtuvo como resultado una respuesta rápida ante perturbaciones, tal y como se muestra en el capítulo 5, en los resultados de las simulaciones.

Mediante las simulaciones realizadas se observan las ondas de voltaje y corriente obtenidas, las cuales demuestran que la fuente conmutada diseñada efectivamente cumple con el funcionamiento esperado de acuerdo a los parámetros de diseño descritos en el capítulo tres y cuatro.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el circuito implementado de la etapa AC-DC, se observa que la corriente de entrada no se encuentra en fase con la señal de voltaje de entrada de prueba aplicado, lo que indica que no se logró el factor de potencia unitario, debido a varios factores negativos entre los cuales se puede mencionar que los elementos a usar no fueron bien dimensionados por lo cual al realizar la prueba con los requerimientos de voltaje solicitado (120Vrms) sufrieron un fuerte sobrecalentamiento y tuvieron que ser reemplazados por elementos que hallamos en el mercado local, a parte dichos elementos fueron dimensionados para una prueba con un voltaje de entrada directo de la línea y no con un voltaje de 14Vrms que fue el empleado luego de las pruebas fallidas inicialmente.

Para poder obtener el valor real del factor de potencia se necesita utilizar un analizador de espectro

de frecuencias con la finalidad de observar las corrientes armónicas existentes que no fueron canceladas con el circuito PFC implementado y como resultado no se obtuvo una eficiencia similar a la registrada en las pruebas de simulación.

7. Referencias

- [1] Electrónica Fácil, “Fuentes conmutadas”, 12 de enero del 2015, disponible en www.electronicafacil.net.
- [2] Fidestec, “Fuentes de alimentación conmutadas”, 15 de diciembre del 2014, disponible en fidestec.com/blog.
- [3] José Miguel Castillo Castillo, “Fuentes de alimentación conmutadas (switching)”, 15 de diciembre del 2014, disponible en es.slideshare.net/Jomicast.
- [4] ON Semiconductor, “Power Factor Correction”, 15 de diciembre del 2014, disponible en www.onsemi.com.
- [5] Dr. Raja Ayyanar, “Lecture 16 AC-DC conversion PFC circuits”, 15 de diciembre del 2014, disponible en www.coursehero.com/file/6268730/Lecture-16-Boost-PFC/.
- [6] South Valley University, “Power Electro”, Capítulo 8, Fig. 12, 15 de diciembre del 2014, disponible en www.svu.edu.eg.
- [7] Wikipedia, “Duty Cycle”, 15 de diciembre del 2014, es.wikipedia.org.
- [8] Dr. Raja Ayyanar, “Forward Converter Analysis Part2”, 1 de diciembre del 2014, disponible en www.youtube.com/user/ayyanaraz.
- [9] Dr. Raja Ayyanar, “Forward Converter design”, 1 de diciembre del 2014, disponible en www.youtube.com/user/ayyanaraz.
- [10] Dr. Raja Ayyanar, “Forward Converter Analysis Part1”, 1 de diciembre del 2014, disponible en www.youtube.com/user/ayyanaraz.
- [11] Dr. Raja Ayyanar, “Boost Converter design”, 1 de diciembre del 2014, disponible en www.youtube.com/user/ayyanaraz.
- [12] LinearTechnology, “Design a Simple, Efficient and Reliable Forward Converter”, 10 de marzo del 2015, disponible en www.youtube.com/user/LinearTechnology.
- [13] Dr. Raja Ayyanar, “Lecture 12 Current mode”, página 4, 10 de enero del 2015.
- [14] Asanza M. José; Quimis Q. Martha, “Diseño del control y Simulación de un restaurador Dinámico de Voltaje trifásico”, capítulo 4 (modelamiento y diseño del controlador), 10 de marzo del 2015.
- [15] Dr. Raja Ayyanar, “Lecture 11 K-factor approach”, 10 de marzo del 2015.
- [16] Ronald’s electronic, “The Boost Converter, figure 2”, 25 de abril del 2015, disponible en www.dos4ever.com.

- [17] Sam Abdel-Rahman, Franz Stückler, Ken Siu, “PFC Boost Converter Design Guide”, Figure 3, 25 de abril del 2015, disponible en www.infineon.com.
- [18] Dr. Raja Ayyanar, “Boost Converter Analysis”, 25 de abril del 2015, disponible en www.youtube.com/user/ayyanaraz.