

# FIXTURA DE PRUEBA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CONTROLADORES PARA CONVERTIDORES BIDIRECCIONALES CA-CD

***Julio Ortega Alejos***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*j.ortega@itsur.edu.mx*

***Leonel Estrada Rojo***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*l.estrada@itsur.edu.mx*

***Alejandro Aguilar Ibarra***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

***Luis Gerardo López Álvarez***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

***Luis David Pérez Vera***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato

## Resumen

La corrección del factor de potencia y la elevación de voltaje en el bus de CD son las principales prestaciones de los convertidores electrónicos bidireccionales CA-CD; Para obtenerlas, se deben de implementar técnicas de control que utilizan lazos de retroalimentación de corriente y de voltaje. Cuando en la práctica se sintonizan los controladores en convertidores que trabajan en el orden de los Kilo Watts y se determina el porcentaje de variación del voltaje de línea que soporta el convertidor, la corriente de línea pierde completamente su estabilidad y provoca que los módulos de IGBTs o MOSFETs de potencia se dañen permanentemente junto con sus impulsores. Esto se traduce en pérdidas económicas substanciales en cada prueba; En este documento se propone una fixtura de prueba que emula

la línea eléctrica para caracterizar los controladores de convertidores bidireccionales, sin exponer sus componentes electrónicos.

**Palabra(s) Clave(s):** emulador de línea eléctrica, inestabilidad, perturbación, señal de control, sintonización de controladores.

## 1. Introducción

La figura 1 muestra el circuito del rectificador PWM monofásico totalmente controlado conectado en puente, el cual utiliza cuatro interruptores de potencia con diodos conectados en anti-paralelo para obtener un voltaje de cd controlado,  $V_o$ . Para la operación apropiada de este rectificador, la magnitud del voltaje de salida debe ser mayor que la del voltaje de entrada en cualquier momento posterior al transitorio de arranque [1, 2, 3].

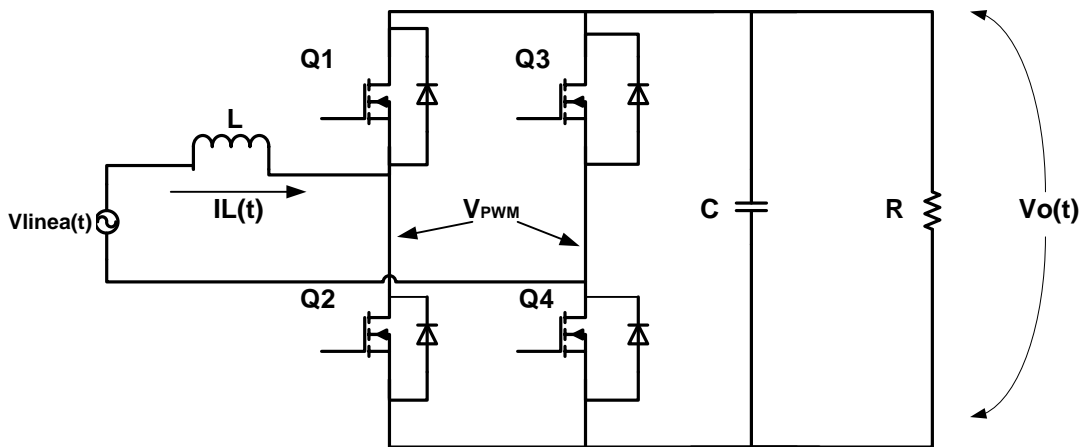


Figura 1 Rectificador PWM monofásico en conexión puente.

El principio de funcionamiento del rectificador PWM se basa en la operación de un convertidor BOOST, el cual pertenece a la familia de convertidores de transferencia de energía indirecta. El procesamiento de la potencia involucra una fase de almacenamiento y una de liberación de energía. Durante el tiempo de encendido de un par de transistores (Q1 y Q3 ó Q2 y Q4) el inductor almacena energía y el capacitor por si solo suministra energía a la carga.

Cuando conducen los transistores Q1 y Q4 ó Q3 y Q2, la energía almacenada en el inductor aparece en serie con la fuente de alimentación y contribuye a suministrar energía al capacitor y a la carga, figura 2.

Esta configuración del rectificador PWM proporciona una corriente de entrada no pulsante en el modo de operación de conducción continua y hace de ésta una topología de bajo rizo en la corriente de entrada gracias a que un inductor se opone a variaciones rápidas de la corriente.

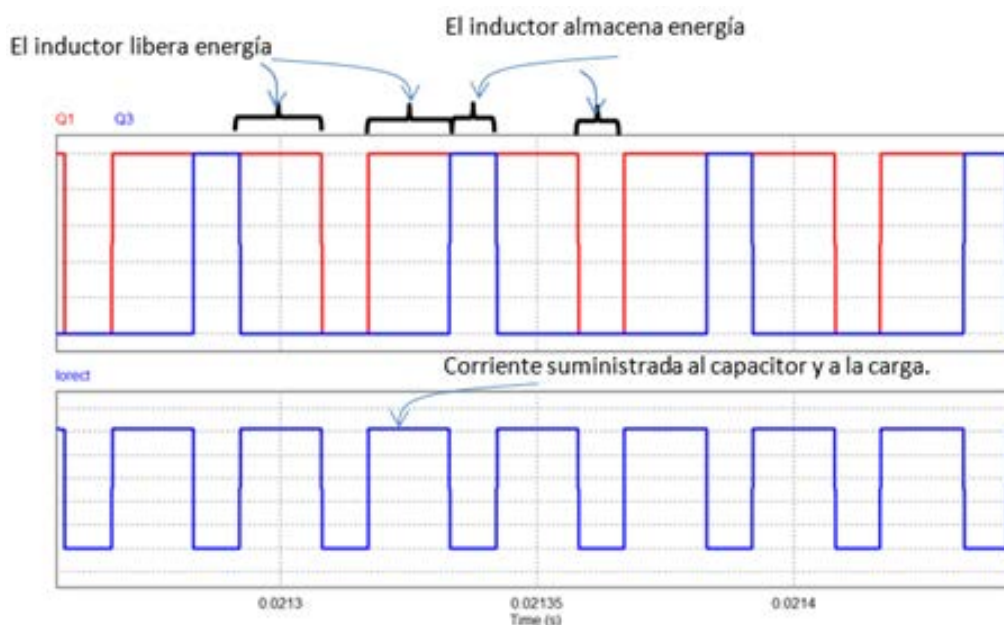


Figura 2 Ondas de señales de activación y de corriente de alimentación del capacitor.

Los posibles estados de conmutación de los interruptores con los que puede operar el rectificador PWM se identifican de acuerdo al nivel de voltaje establecido entre los puntos a' y b', conocido como VPWM y son los siguientes:

1. Q1 y Q4 están encendidos, Q2 y Q3 están apagados; por lo que  $VPWM = V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.
2. Q1 y Q4 están apagados, Q2 y Q3 están encendidos; por lo que  $VPWM = -V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.
3. Q1 y Q3 están encendidos, Q2 y Q4 están apagados; por lo que  $VPWM = 0$ .  
O bien, Q1 y Q3 están apagados, Q2 y Q4 están encendidos; por lo que  $VPWM = 0$  y se almacena energía en el inductor.

Para obtener dichos estados de conmutación se utiliza una modulación senoidal, en donde se hace variar el ancho de cada pulso en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. Las señales de control se generan comparando una señal senoidal de referencia de frecuencia  $f_r$  con una onda portadora triangular de frecuencia  $f_c$ , figura 3.

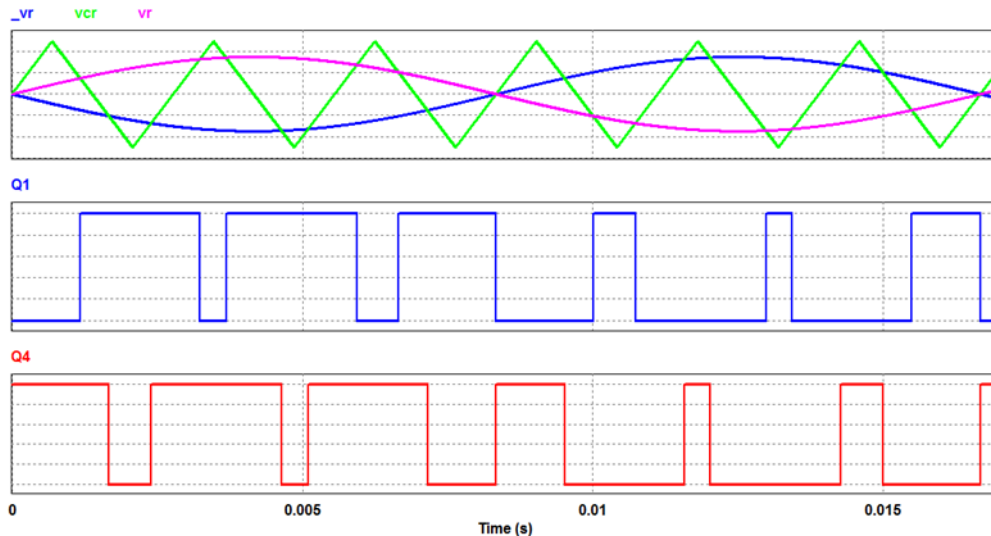


Figura 3 Señales de control de interruptores a partir de modulación senoidal.

La amplitud pico de la señal de referencia controla el índice de modulación de amplitud  $m_a$  y en consecuencia el voltaje de salida del convertidor. Al comparar la señal portadora bidireccional  $v_c$ , con dos señales de referencia,  $v_r$  y  $-v_r$ , se producen las señales de disparo de los transistores Q1 y Q4 respectivamente.

Las señal de disparo del transistor Q2 es el complemento de Q1 y la de Q3 el complemento de Q4. La cantidad de pulsos por ciclo la establece el índice de modulación de frecuencia ( $M_f$ ) que se encuentra en función de las frecuencias de la señal portadora de las señales de referencia.

$$M_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (1)$$

Cuando es  $M_f$  es mayor a 21 se dice que se tiene un rectificador muy modulado y cuando es menor se dice que está poco modulado [5].

## Control del rectificador PWM

El esquema de control clásico se muestra en la figura 4. El control incluye un controlador de voltaje en cascada con uno de corriente [6]. Típicamente es un controlador proporcional- integral (PI), el cual controla la cantidad de potencia requerida para mantener el voltaje de salida de CD ( $V_o$ ) constante. El controlador de voltaje proporciona el punto de ajuste de la amplitud de la corriente de entrada. Por esta razón, la salida del controlador de voltaje se multiplica por una señal senoidal con la misma fase y frecuencia del voltaje de la red,  $v_s(t)$ , a fin de obtener la referencia de la corriente de entrada,  $i_{sref}$ .

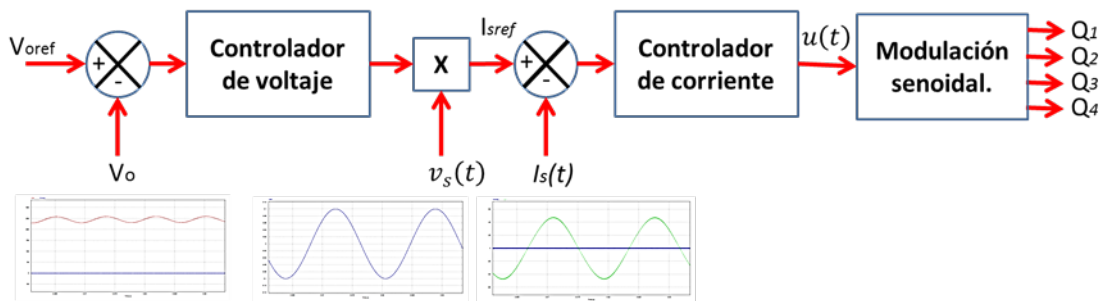


Figura 4 Esquema de control clásico para el rectificador PWM.

El controlador de corriente proporciona la señal de control que determinará el índice de modulación de amplitud. La rápida respuesta del controlador de corriente, provoca que se obtenga un alto factor de potencia en la entrada del convertidor.

El voltaje de salida del rectificador,  $V_o$ , presentará un rizo con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de línea. Si este rizo pasa a través del controlador de voltaje, producirá una componente del tercer armónico en la corriente de entrada. La amplitud de este armónico se puede atenuar con un filtro pasa bajas en la retroalimentación del voltaje de salida,  $V_o$ .

## Diseño del convertidor

El sistema está conformado principalmente por la etapa de potencia que se encargará de realizar la conversión de energía alterna a continua a través del

rectificador PWM, el cual es comandado por las señales provenientes de la etapa de control en donde se implementan en un micro-controlador los algoritmos para la regulación de voltaje y corriente, tal como se muestra en la figura. 5.

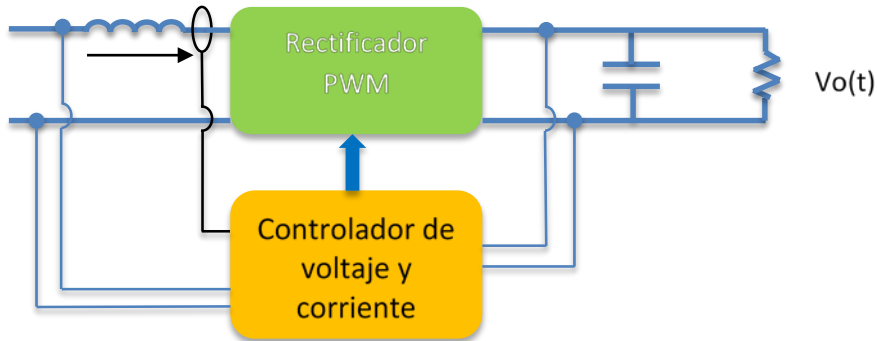


Figura 5 Diagrama a bloques del Rectificador PWM en lazo cerrado.

En la figura 6 se muestra el prototipo del convertidor diseñado para 2 kW de potencia; se utilizaron módulos de IGBTs cuyo precio oscila en \$50 dólares, los impulsores para disparar a los IGBTs utilizan fuentes de alimentación aisladas que cuestan alrededor de 10 dólares cada una y también se necesitan optoacopladores de alta velocidad que cuestan 3 dolares cada uno. Si llega a dañarse el módulo de IGBTs, se dañan también los componentes de los impulsores, esto quiere decir que por cada prueba destructiva se pierden \$102 dólares para un prototipo de baja potencia.



Figura 6 Prototipo del convertidor CA-CD bidireccional.

Cuando se sintoniza el controlador, el sistema llega a tener perturbaciones que provocan la destrucción de los componentes más sensibles (IGBTs e impulsores); Una vez sintonizado el controlador y se desea determinar el rango de variación de voltaje de línea que soporta el convertidor, éste no solo deja de mantener el voltaje del bus de CD constante, la corriente de línea senoidal y en fase con el voltaje de entrada, como lo hace en lazo abierto, sino que la corriente se deforma completamente dejando de ser senoidal y de magnitud no determinada (normalmente de magnitud que triplica a lo que se demanda de forma controlada), provocando el deterioro y destrucción del convertidor.

En la figura 7 se muestra el momento en el que se arranca el convertidor controlado, con un voltaje de línea por debajo del rango de variación aceptado, se puede observar que la forma de onda de la corriente de línea carece de simetría y presenta valores por arriba de su magnitud en estado estable (señal verde, canal 4), mientras que el voltaje de salida en el bus de CD presenta una variación en su magnitud (señal rosa canal 3). Cuando se incrementa el voltaje de línea con el variac, el convertidor se estabiliza y la corriente es senoidal.

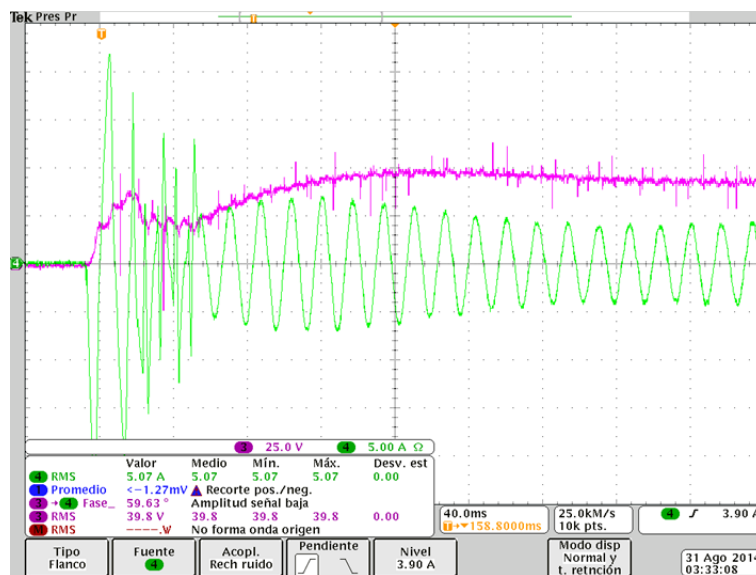


Figura 7 Prototipo del convertidor CA-CD bidireccional.

En la figura 8, se muestra otro arranque del convertidor controlado, pero ahora con un voltaje de línea dentro del rango de variación tolerado por el convertidor, se

puede apreciar que aunque se demandó mayor corriente de línea, la forma de onda inició senoidal y así se mantuvo durante el cambio de carga.

Las pruebas experimentales que se presentan son con niveles bajos de potencia, aunque también se realizaron a plena carga, provocando la destrucción del convertidor.

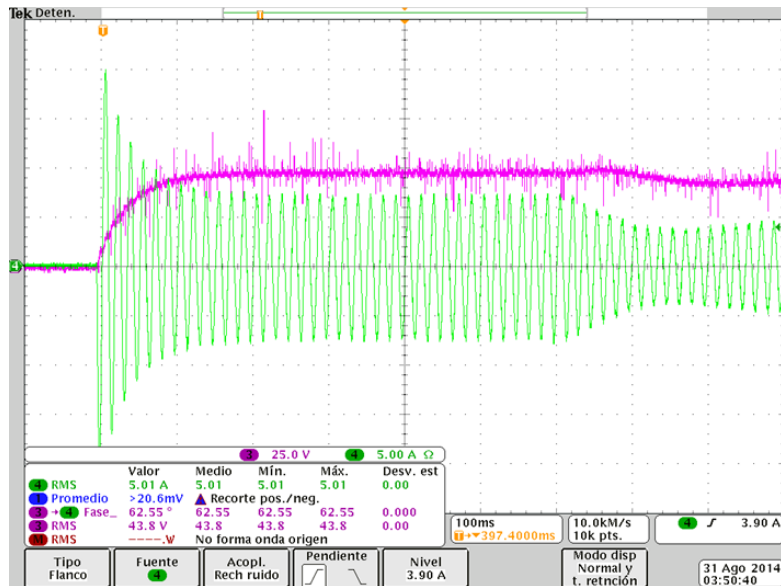


Figura 8 Prototipo del convertidor CA-CD bidireccional.

Con estas evidencias que se han mostrado se justifica la necesidad de una fixtura de prueba que permita caracterizar al controlador ante diferentes escenarios en las magnitudes y fase de la corriente y voltaje de línea, a través del comportamiento de las señales de control que provocan la inestabilidad del sistema; De esta manera se podrían implementar protecciones por hardware o software antes de caracterizar el controlador directamente con la línea.

## 2. Desarrollo

En la figura 9 se presenta la propuesta de la fixtura de prueba, en donde ya no es necesario demandar los niveles de voltaje y corriente a plena carga para determinar el comportamiento del controlador del convertidor, ahora mediante una computadora se pueden emular las señales de voltaje y corriente de línea; se



pueden establecer diferentes escenarios a los que puede estar sometido el controlador, entre los que destacan: defasamiento entre la corriente y voltaje de línea para la prueba como inversor y como rectificador, generación de armónicos, variación en la amplitud del voltaje y corriente de manera independiente para simular cambios de carga, principalmente.

Como interfaz entre la computadora y el controlador (figura 9) se utiliza el dispositivo programable myRIO de National Instruments (NI) y la interfaz gráfica de usuario se desarrolló utilizando LabVIEW de NI.

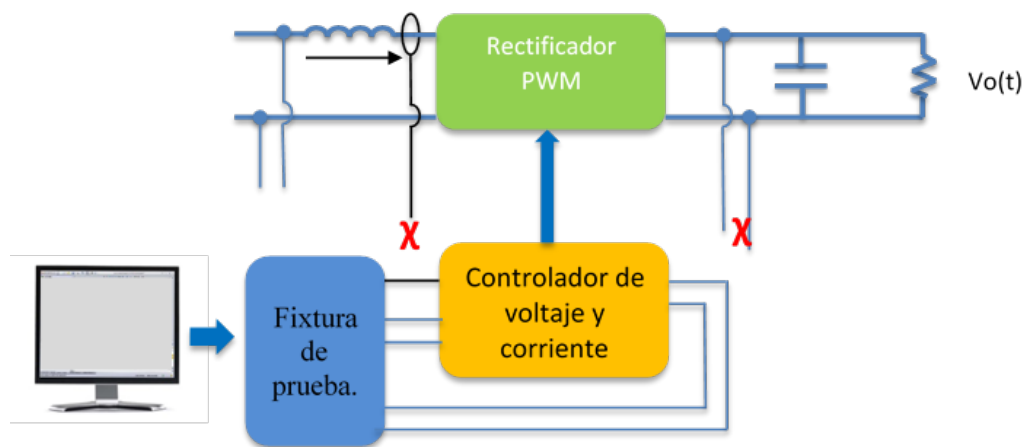


Figura 9 Propuesta de la fijatura de prueba de controladores.

El dispositivo NI myRIO es un hardware embebido que posee internamente un procesador y un FPGA, así como los periféricos de módulos de entrada-salida analógicos y digitales, ADC, tarjeta WIFI, entre otras prestaciones. El proyecto se comenzó a desarrollar en la plataforma de LabVIEW utilizando los bloques de funciones de NI myRIO 2015 trabajando sobre la FPGA del dispositivo

En la figura 10 se muestra la configuración correspondiente al voltaje de línea emulado con armónicos, donde se configura la frecuencia fundamental que será la misma para el voltaje y la corriente, el defasamiento, el offset, y el factor de escala, donde el defasamiento se encuentra en el dominio del tiempo; como el voltaje es la señal de referencia su defasamiento es de cero y su offset es de 2048 para que la señal se pueda exportar bien, ya que las salidas de la MyRio son

salidas positivas. El factor de escala es la amplitud de la señal, y los demás armónicos son el tercer, quinto, séptimo y noveno armónico, los valores son del 0 a 1, donde 1 es la amplitud máxima del armónico.

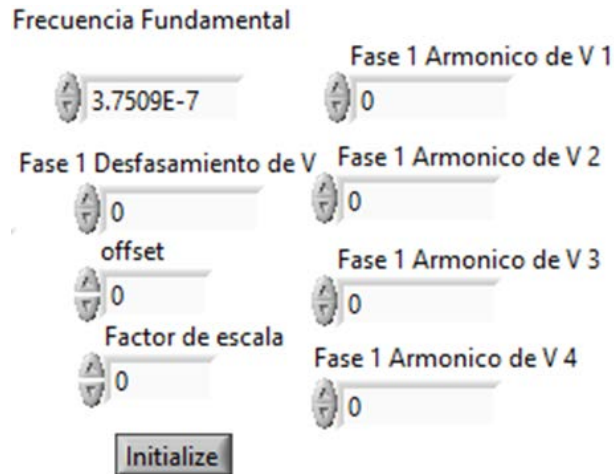


Figura 10 Configuración de la primera señal con los armónicos en FPGA.

Al igual que la señal de voltaje de línea, en la segunda señal (la corriente de línea), se configuran los valores del desfasamiento de 0 a 0.999 correspondientes a una variación de 0° a 360°, el offset también se ajusta a 2048, el factor de escala modifica el valor de la amplitud, los armónicos que se pueden agregar son el tercer, quinto, séptimo y noveno, figura 11.

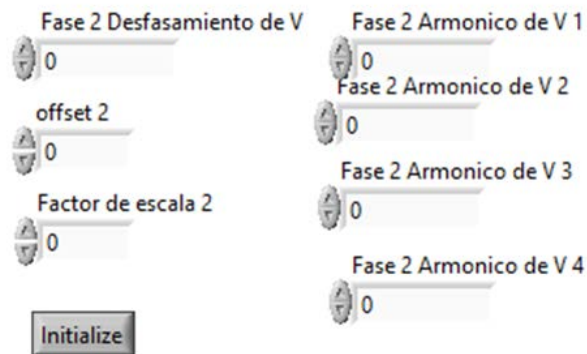


Figura 11 Configuración de la segunda señal con los armónicos en FPGA.

En la figura 12 se muestra el generador de señal senoidal en la FPGA, al cual se le proporcionan los valores de frecuencia (definidos por periodo sobre ticks, donde

los ticks corresponden a la velocidad del oscilador), también se le agrega el periodo y el defasamiento.

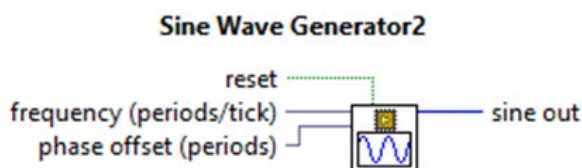


Figura 12 Generador de señal senoidal en FPGA.

En la figura 13 se muestra el generador de señal de la fundamental, donde los valores que se proporcionan son la frecuencia fundamental, el valor de defasamiento, la salida de la señal se le suma un valor de offset de 2048, esto por motivo que la salida de MyRio es salida positiva no tiene negativos, por lo que se le suma un offset para que esta señal solo entregue valores positivos, el valor resultante se multiplica por el factor de escala, el cual es la amplitud de la señal, el valor resultante, se le sumaran los armónicos.

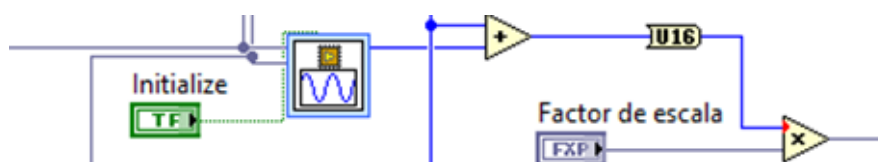


Figura 13 Señal fundamental.

Para agregar el contenido armónico a las señales fundamentales, se utilizaron más bloques de funciones senoidales de las herramientas de la FPGA, pero ésta vez la frecuencia multiplicada por múltiplos impares a la fundamental (armónico 1, 3, 5, etc.) y sumados a la fundamental. De manera que en la interfaz de usuario se puede agregar un armónico específico a cada fase con su respectiva amplitud.

En la figura 14 se muestran el generador de armónicos, el armónico 1 es 3 veces la frecuencia fundamental, el armónico 2 es 5 veces la frecuencia fundamental. En la figura 14 se genera el noveno armónico, por lo que el valor de la frecuencia se multiplica por 9 para tener 9 veces la frecuencia de la fundamental, este valor se agrega a un generador de señal para obtener la señal senoidal a 9 veces la

frecuencia de la fundamental, a este valor de salida se le multiplica por un factor de escala de este armónico, que se le suma a la salida de la fundamental.

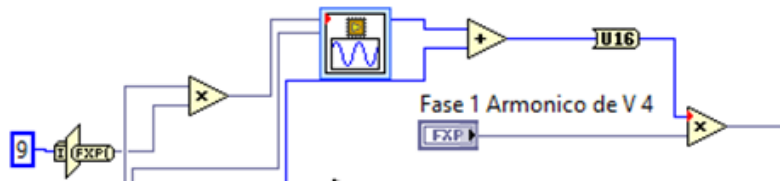


Figura 14 Armónico que se le agrega a la señal fundamental.

En la figura 15 se muestra la interfaz de usuario en el microprocesador de la MyRio, el cual es el panel donde el usuario interactuara con el programa, en panel se puede observar los controladores como factor de escala 1, factor s escala 2, y factor de escala 3, que corresponden a las amplitudes de las señales fundamentales, el número corresponde a la señal que se desea manipular. Se puede modificar la frecuencia fundamental, de igual forma se presentan los controladores de los armónicos, en porcentaje, los primeros 4 son para la primera señal, los de en medio para la segunda señal y los últimos para una tercer señal.

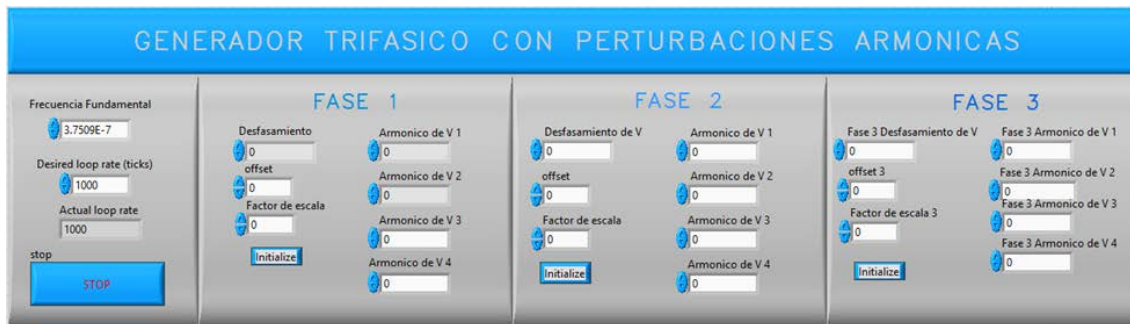


Figura 15 Interfaz de usuario del emulador.

Es necesario señalar que la amplitud de los armónicos no debe ser mayor a 1 (por el tipo de datos que acepta el bloque para la generación de la onda senoidal), ya que de lo contrario se puede saturar la señal esto debido a las limitaciones de la myRIO.

En la figura 16 se muestra el código en el microprocesador donde se inicia llamado el código de la FPGA, y se llama a los componentes que lo componen, de esta

forma a todos los controladores se les cargarán los valores directamente desde el microprocesador, algunos valores fijos se le cargan mediante constantes, mientras que los valores variables con controladores que se modifican su valor desde el panel frontal.

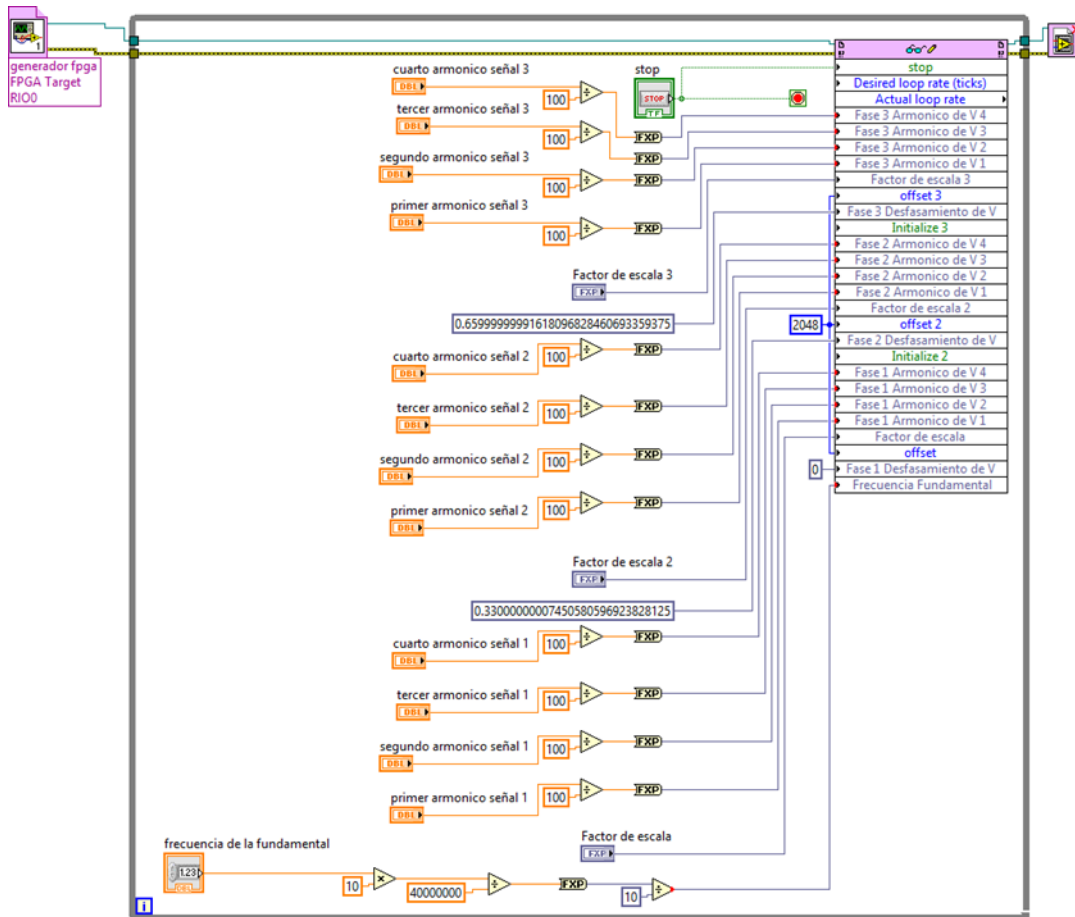


Figura 16 Código en el microprocesador.

Para los valores de los armónicos, se dividió el valor que se desea entre 100 para de esta forma sólo tener valores e 0 a 1, ya que ese es el valor que acepta el generador de señal. Luego este valor se cambia de punto flotante a punto fijo, que es el valor que acepta el generador, esto se utiliza para todos los armónicos de las 3 señales. De igual forma el valor de la frecuencia se cambia a punto fijo. Y los valores de factor de escala de las señales también están en punto fijo.

### 3. Resultados

Con fin de probar el emulador diseñado se utilizó otra PC, para poder adquirir las señales generadas. Para la adquisición se realizó un programa basado en Labview utilizando otro dispositivo myRIO, esto el fin de obtener la menor cantidad de errores debido a la adquisición o al dispositivo de adquisición. Cabe señalar que se usó la myRIO debido a su superioridad (capacidad de procesamiento, mayor resolución y mayor número de muestras por segundo) frente a otros dispositivos de adquisición como lo pueden ser las tarjetas DAQ.

En la figura 17 se presentan las señales generadas, pero en este caso solo se presentan armónicos en una de ellas, esta señal cuenta con los primeros 2 armónicos (3er y 5to armónicos) por lo que la señal se deforma de tal manera que ya no es una señal senoidal. También se puede apreciar que se puede realizar el defasamiento entre las señales tomando a una como referencia.

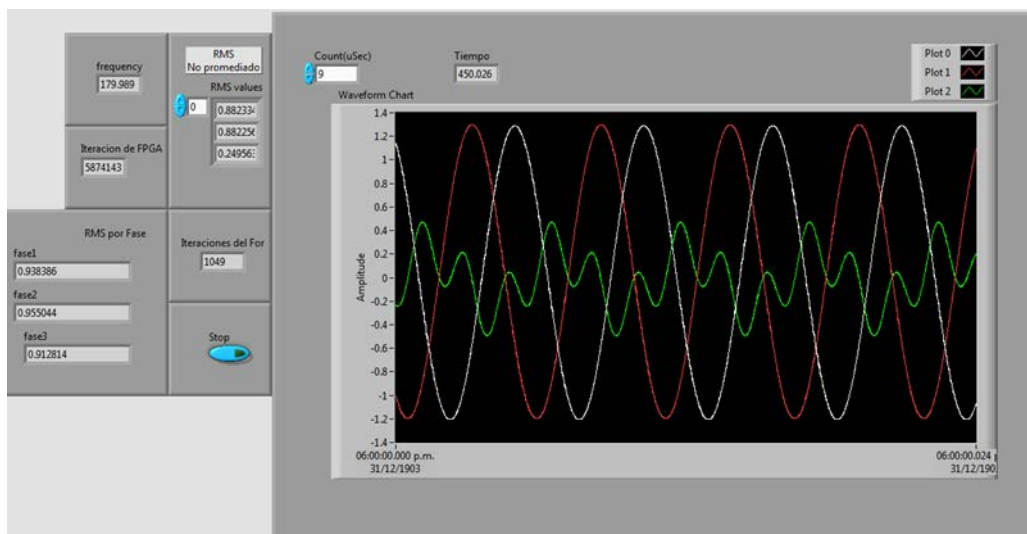


Figura 17 Adquisición de las señales generadas con armónicos en una de las faces.

### 4. Discusión

Con la fixtura propuesta se pueden emular diferentes escenarios a los que puede estar sometido un controlador de un convertidor de potencia, los cuales servirán para determinar los niveles de las señales involucradas en cada bloque del controlador para poder establecer límites por software, alarmas o protecciones

previas a la prueba en línea cuando se estén haciendo ajustes durante la sintonización.

Se podrán analizar también las señales de conmutación de los transistores que provocan la destrucción del prototipo ante variaciones del voltaje de línea; Con esta pre caracterización se podrán determinar los niveles en los acondicionadores de señal que disparen las protecciones ante perturbaciones de línea, SAGS o SWELLS. La prueba de un controlador no está contemplado en este documento.

## **5. Conclusiones**

Ante las pérdidas económicas que significa cada prueba destructiva de un convertidor bidireccional, en este trabajo se presentó la necesidad de una fixtura de prueba para la caracterización de controladores. La fixtura propuesta genera señales de voltaje variantes con el tiempo que emulan el comportamiento de la corriente y voltaje de línea. Las pruebas del controlador con la fixtura eliminan la incertidumbre y el estrés que se manifiestan durante las pruebas con niveles de potencia en el orden de los kW.

Desde el punto de vista académico resulta también una herramienta muy útil, ya que los estudiantes podrán hacer uso de esta fixtura para la caracterización de controladores y entender la interacción entre lazos de control en cascada o anidados en las materias de Control, Sistemas Lineales, Electrónica de potencia, entre otras.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Grman, L., Hraňsko, M., Kuchta, J., Buday J., Single phase pwm rectifier in traction application, journal of electrical engineering, vol. 62, no. 4, 2011, 206–212.
- [2] Balamurugan, R., Gurusamy, G., Harmonic Optimization by Single Phase Improved Power Quality AC-DC Power Factor Corrected Converters, 2010, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volumen1 – No. 5.

- [3] Rodríguez, J.R.; Dixon, J.W.; Espinoza, J.R.; Pontt, J.; Lezana, P., "PWM regenerative rectifiers: state of the art", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Volume 52, Issue 1, Feb. 2005. Page(s): 5 – 22.
- [4] Pérez R. Javier, Núñez G. Ciro A. y Cárdenas G. Víctor M. Control lineal para un rectificador monofásico PWM puente completo. *RIEE&C, revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, vol. 7 no. 2, diciembre 2009.
- [5] Rashid Muhammad H. *Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, Tercera Ed., Pearson, Prentice Hall, 2004.
- [6] O. Stihl. A single-phase controlled current PWM rectifier. *IEEE transaction on power electronics*. Vol3, No. 4, 1988.