

Implementación de un Banco Didáctico para la Enseñanza de Electrónica de Potencia

Elias Oggier^{#1,2}, Eric Mayna[#], Germán Oggier^{#,2} y Guillermo García^{#,2}

[#] Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nacional #36 Km. 601, X5804BYA, Río Cuarto, Córdoba, Argentina. ² CONICET.

¹ eliasoggier@gmail.com

Abstract— The implementation of training equipment for the teaching of power electronics is presented in this document. This equipment allows setting different experiences in a simple manner, using two three-phase modules as the main core. Modulation and control strategies are programmed using Simulink, which reduces the times for the implementation. Experimental results are presented demonstrating its feasibility and simple configuration.

Resumen— Se presenta la implementación de un banco didáctico para la enseñanza de electrónica de potencia, el cual permite realizar diferentes experiencias configurando el banco en función de la topología que se desee ensayar de una manera simple. Las diferentes estrategias de modulación y control de los convertidores se programan utilizando la herramienta Simulink[®] de Matlab[®], lo que permite reducir los tiempos de implementación. Se presentan resultados experimentales obtenidos con el banco propuesto demostrándose su validez y simple configuración.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la Electrónica de Potencia (EdeP) ha experimentado un enorme progreso tanto a nivel de nuevos convertidores como del desarrollo de nuevos y mejores dispositivos semiconductores [1], [2]. En la actualidad, la EdeP está presente en los convertidores CA-CC (rectificadores), convertidores CC-CC, CC-CA (inversores) y CA-CA (convertidores directos de frecuencia), cuyo objetivo es el de controlar y convertir la energía eléctrica en función de los requerimientos de las cargas que se requieran alimentar [3], [4].

Esta situación, ha motivado la utilización de equipamiento didáctico en el área de la EdeP para que los estudiantes puedan afianzar mejor los conceptos adquiridos durante el cursado [5], facilitando y potenciando la enseñanza académica, tanto en cursos de grado como de postgrado, con la implementación de prácticas de laboratorio [6], [7].

Una dificultad para implementar estas prácticas de laboratorio es que los equipos comerciales para la enseñanza de EdeP son, en general, más adecuados para el entrenamiento de operarios en la industria que para afianzar los conceptos teóricos dictados en los cursos universitarios. Además poseen un costo elevado, lo que en muchos casos inviabiliza su compra. Por ello, en muchas oportunidades, las universidades se ven forzadas a proyectar y construir sus propios equipos de laboratorio [8], [9].

En este trabajo se presenta la implementación de un Banco Didáctico para la enseñanza de Electrónica de Potencia (BDEP), compuesto de dos módulos trifásicos configurables como elementos principales del banco propuesto. Este banco permite ensayar las diferentes topologías de convertidores de EdeP que se estudian en los cursos actuales, configurando el

BDEP propuesto en función de los requerimientos y conectando algunos pocos elementos adicionales para completar cada esquema.

Para el control del BDEP, resulta conveniente utilizar microcontroladores que puedan programarse de una manera rápida y ágil, sin que se requiera conocer los códigos fuentes de los dispositivos. Para ello, pueden utilizarse determinados software específicos [10], [11]. En los últimos años, Simulink[®] (de MathWorks), ha incorporado herramientas que permiten la traducción directa del algoritmo de modulación y control implementado en un entorno de simulación a código de hardware (DSPs, FPGAs, entre otros) [12]. Esto permite explotar las ventajas de programar el microcontrolador a través de una interfaz de usuario amigable y conocida por los estudiantes [13].

Se presentan resultados experimentales obtenidos, demostrándose la viabilidad práctica de la propuesta.

II. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DIDÁCTICO PROPUESTO

A. Descripción General

La Fig. 1 muestra un diagrama de bloques del BDEP propuesto, el cual posee los siguientes elementos principales:

- Una etapa de potencia formada por dos módulos trifásicos configurables (M1 y M2) y
- Una etapa de control formada por los circuitos de activación de los transistores, los circuitos de medición de tensiones y corrientes, un microcontrolador (DSP) y una PC que actúa como interfaz de usuario para la programación del DSP.

Para poder ensayar las diferentes topologías de convertidores, el BDEP se configura en función del convertidor a ensayar. Se conectan en los terminales correspondientes, indicados en la figura, la fuente de alimentación y la carga, junto con los componentes pasivos (como filtros L-C) y/o transformadores de alta frecuencia, propios de cada topología [14].

B. Etapa de Potencia

La Fig. 2 muestra el circuito eléctrico correspondiente a uno de los módulos trifásicos indicados en la Fig. 1. Este módulo posee tres “piernas” formadas cada una de ellas por dos transistores IGBT conectados en serie con sus respectivos diodos en antiparalelo.

Cuando se activa el transistor superior de una pierna, la tensión del punto medio de esa pierna tendrá un valor igual al de la barra positiva (P) y si se activa el transistor inferior, la tensión del punto medio tendrá un valor igual al de la barra negativa (N).

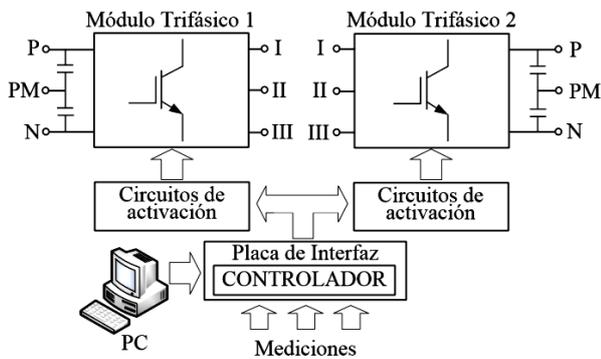


Fig. 1. Diagrama general del BDEP propuesto.

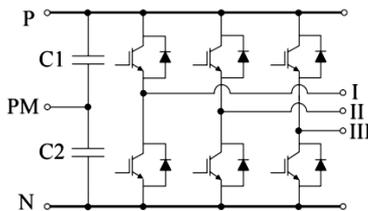


Fig. 2. Circuito eléctrico de uno de los Módulos Trifásicos del BDEP.

Por último, también se conecta un divisor de tensión capacitivo con acceso a su punto medio (PM) en cada uno de los módulos trifásicos [15].

Las topologías de convertidores electrónicos que pueden ensayarse con el BDEP propuesto son las siguientes:

- Rectificadores CA-CC monofásicos y trifásicos de media onda y onda completa. Pudiendo ser pasivos (sin control de fase) y activos,
- Convertidores CC-CC básicos no aislados: reductor, elevador, reductor-elevador, puente completo y semipuente,
- Convertidores CC-CC aislados: *flyback*, *forward*, *push-pull*, resonante serie, resonante paralelo, puente completo aislado y semipuente aislado,
- Inversores monofásicos bipolares y unipolares, con modulación de onda cuadrada, eliminación de armónicos y seno-triángulo,
- Inversores trifásicos con modulación de onda cuadrada, eliminación de armónicos, seno-triángulo, inyección de tercer armónica y modulación vectorial.
- Convertidores CA-CA en configuración *back-to-back*.

La utilización de los módulos trifásicos tiene la ventaja de simplificar la implementación de estas topologías [16], activándose únicamente los transistores requeridos y dejando el resto apagados para que no interfieran en el circuito a ensayar.

Como trabajo futuro, también se pretende completar el banco actual para que permita implementar otras topologías de convertidores electrónicos.

C. Etapa de control, medición y adaptación de señales

Para controlar el BDEP es necesario generar las señales de PWM requeridas y realizar mediciones de determinadas señales eléctricas con funciones de medición, protección y control.

Para conectar los periféricos del microcontrolador utilizado, se diseñó y construyó una placa de adaptación, la cual se representa como "Placa de Interfaz" en la Fig. 1. Esta placa permite acondicionar y limitar la tensión de las señales

que ingresarán al DSP y también permite amplificar las señales PWM de salida a un valor adecuado para los circuitos de activación de los transistores de potencia.

También se diseñaron e implementaron los circuitos de activación de los transistores de potencia, los cuales cumplen la función de aislar y amplificar las señales provenientes del controlador a niveles requeridos por los transistores. Para aislar el controlador de la etapa de potencia se utilizaron optoacopladores rápidos con funciones de protección integradas [17].

Para las mediciones de tensión y corriente, necesarias en cada topología, se emplearon sensores aislados de efecto Hall, los cuales generan una señal de corriente proporcional a la variable a medir (tensión y corriente). Estos sensores poseen ventajas frente a los medidores del tipo shunt, donde la salida es una señal de tensión la que puede verse afectada por la presencia de ruidos. Luego, la señal de corriente es convertida a una señal de tensión mediante un amplificador diferencial incluido en la placa de interfaz y finalmente las señales analógicas son digitalizadas por el convertidor analógico digital (ADC) incluido en el DSP, para su procesamiento.

D. Programación del controlador

Para la programación de las diferentes estrategias de modulación y control, en este trabajo se utiliza un microcontrolador de la familia C2000 de Texas Instruments, los cuales son específicos para aplicaciones de EdeP [19].

El fabricante facilita la programación de estos microcontroladores mediante su entorno de desarrollo integrado, Code Composer Studio™ (CCS), el cual puede combinarse con las herramientas de Matlab® "Target Support Package" y "Real Time Workshop" (RTW), para programarlos desde Simulink®.

La herramienta "Target Support Package" incorpora la librería de Simulink® "Embedded target for TI C2000 DSP" la cual cuenta con bloques de configuraciones predeterminadas para cada DSP específico de la familia C2000 y con funciones programables para cada uno de sus periféricos, estos últimos pueden combinarse con funciones estándar de Simulink®. Para la programación de las diferentes estrategias de modulación y control. En este trabajo se utilizan las funciones correspondientes para configurar los módulos "PWM" para generar las señales de activación de los transistores y "ADC" para la adquisición de las señales medidas [20].

El módulo PWM permite generar tantas salidas PWM independientes como salidas PWM posea el DSP. También permite configurar una señal complementaria para conmutar ambos transistores de una misma pierna y los tiempos de blanqueo entre ellos, además de la posibilidad de generar rutinas de interrupción sincronizadas con este módulo.

Por otro lado, el módulo ADC permite configurar la conversión analógico-digital, estableciendo la frecuencia de muestreo y configurar la cantidad y secuencia de conversiones requeridas.

Cuando se requiere cargar o actualizar el programa que está ejecutando el microcontrolador, la herramienta RTW genera un código fuente a partir del modelo creado en Simulink® y utiliza al programa CCS para cargarlo y ejecutarlo en el DSP.

A modo de ejemplo, en la Fig. 3 se muestra un esquema de un modelo implementado en Simulink para programar un módulo PWM, y ajustar el ciclo de trabajo de la señal generada por medio de la adquisición de una señal externa a través del convertidor ADC. El bloque de ganancia (*Gain*) indicado en la figura, permite adaptar el valor digital de salida del módulo ADC a un valor adecuado para poder modificar el ciclo de trabajo del PWM.

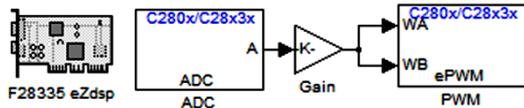


Fig. 3. Diagrama de bloques de Simulink para configurar el módulo PWM de salida y controlarlo por medio del módulo ADC.

III. CONFIGURACIONES DEL BANCO DIDÁCTICO PARA DIFERENTES CONVERTIDORES

A partir de lo expuesto en la sección anterior, el BDEP se configura accediendo a los bornes de conexión disponibles en cada uno de los módulos trifásicos, como se indica en la Fig. 1. del lado de CC, los bornes de acceso se corresponden con los terminales P, N y PM indicados en la Fig. 2 y del lado de CA los bornes de conexión, se corresponden con los terminales I, II y III de un sistema trifásico, ya sea de baja o alta frecuencia, según corresponda. En función de la topología de convertidor que se desee ensayar, serán los terminales que deben conectarse y también de qué lado se conectará la alimentación y la carga.

Por ejemplo, si se desea ensayar un convertidor CA-CC (rectificador), la red de alimentación de CA, se conecta a los bornes del lado de CA, y la carga se conecta en los bornes del lado de CC, respetando la polaridad de los terminales positivos y negativos, P y N, respectivamente. Mientras que si requiere ensayar un convertidor CC-CA (inversor), la conexión de la fuente de alimentación y carga es a la inversa.

En la Tabla I se resumen las conexiones para configurar el BDEP, para los diferentes convertidores que pueden ensayarse.

TABLA I
CONEXIONES DEL BDEP PARA DIFERENTES CONVERTIDORES

Rectificadores CA-CC pasivos y activos	
Media Onda* Monofásico	<u>Alimentación:</u> Se conecta una fase de CA entre I (M1) y el neutro del sistema. <u>Carga:</u> Entre P y N de M1.
Onda Completa* Monofásico	<u>Alimentación:</u> Una fase de CA entre I y II de M1. <u>Carga:</u> Entre P y N de M1.
Media Onda* Trifásico	<u>Alimentación:</u> Se conecta cada fase de CA entre I, II, III de M1 y el neutro del sistema. <u>Carga:</u> Entre P de M1 y el neutro del sistema.
Onda Completa* Trifásico	<u>Alimentación:</u> Se conecta cada fase de CA entre I, II, III de M1 y el neutro del sistema. <u>Carga:</u> Entre P y N de M1.
Convertidores CC-CC no aislados	
Reductor*	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1 <u>Carga + Filtro LC***:</u> Entre I y N de M1
Elevador*	<u>Alimentación:</u> Entre I y N de M1, en serie con L. <u>Carga + Filtro LC:</u> Entre P y N de M1.
Reductor-Elevador**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Carga:</u> entre P y N de M2. L conectado en paralelo con I y N de M1 y M2.
Puente Completo*	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Carga:</u> Entre I y II de M1.

Semipuente*	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Carga:</u> Entre I y N de M1.
Convertidores CC-CC aislados	
Flyback**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Primario Taf****:</u> Entre P y I de M1. <u>Secundario Taf:</u> Entre I y PM de M2. <u>Carga:</u> Entre P y PM de M2.
Forward**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Primario Taf:</u> Entre P y I de M1. <u>Secundario Taf:</u> Entre I y II de M2. <u>Carga+ Filtro LC:</u> Entre P y II de M2.
Push-pull**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Primario Taf:</u> Entre I y II (M1), punto medio P (M1). <u>Secundario Taf:</u> Entre I y II (M2). <u>Carga+ Filtro LC:</u> Entre P (M2) y el punto medio del secundario de Taf.
Resonante serie**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Carga:</u> Entre P y N de M2. Lr y Cr**** en serie entre I de M1 y I de M2. PM de M1 se conecta con II de M2.
Resonante paralelo**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1 <u>Carga:</u> Entre P y N de M2. Lr y Cr en serie entre I y PM de M1. Cr en paralelo con I y II de M2.
Puente Completo**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Primario Taf:</u> Entre I y II de M1. <u>Secundario Taf:</u> Entre I y II de M2. <u>Carga+Filtro LC:</u> Entre P(M2) y punto medio del Taf.
Semipuent.**	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1 <u>Primario Taf****:</u> Entre I y PM de M1. <u>Secundario Taf:</u> Entre I y II de M2 <u>Carga+Filtro LC:</u> Entre P(M1) y punto medio del Taf.
Inversores CC-CA	
Puente Completo* Monofásico	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Carga:</u> Entre I y II de M1.
Semipuente* Monofásico	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Carga:</u> Entre I y PM de M1.
Puente Completo* Trifásico	<u>Alimentación:</u> Entre P y N de M1. <u>Carga:</u> En I, II y III de M1.
Convertidores CA-CA	
back-to-back** Monofásico	<u>Alimentación:</u> Una fase de CA entre I y II de M1. <u>Carga:</u> Entre I y II de M2. Se conectan los terminales P y N de M1 Y M2.
back-to-back** Trifásico	<u>Alimentación:</u> Cada fase de CA entre I, II y III de M1 <u>Carga:</u> Entre I, II y III de M2. Se conectan los terminales P y N de M1 Y M2.

* Se utiliza M1, ** Se utilizan M1 y M2
*** L = Inductor de filtro, C = capacitor de filtro
**** Lr y Cr = Inductor y capacitor de alta frecuencia
***** Taf = Transformador de alta frecuencia

IV. RESULTADOS

En esta sección se presentan resultados experimentales obtenidos con el banco didáctico propuesto. En la Fig. 4 se muestra una fotografía del BDEP implementado, mientras que sus componentes y características principales se indican en la Tabla II y en la Tabla III, respectivamente.

Por razones de espacio, en este trabajo se describen y ensayan las topologías de convertidores CC-CC reductor y elevador, convertidor puente completo, convertidor resonante serie e inversores monofásicos, como se describe a continuación.

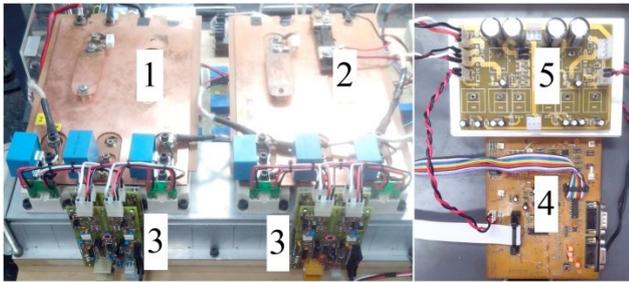


Fig. 4. Fotografía del Banco Didáctico implementado

TABLA II
COMPONENTES DEL BDEP IMPLEMENTADO

1	Módulo trifásico 1 (M1)
2	Módulo trifásico 2 (M2)
3	Circuitos de activación de los transistores
4	Placa interfaz y de desarrollo del DSP
5	Fuente de alimentación de la etapa de control, medición y adaptación de señales

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DEL BANCO DIDÁCTICO IMPLEMENTADO

Potencia de salida por módulo trifásico	1 kW
Frecuencia de conmutación máxima	20 kHz
Tensión máxima de CC de entrada	600 V
Tensión máxima de CA de entrada (rms)	400 V
Transistores de potencia	
Modulo IGBT POWEREX CM150DY-12H	600 V, 150 A
Capacitores divisores de tensión de los módulos trifásicos	
NIPPON CHEMI-CON	450 V, 2200 uF

A. Convertidores CC-CC Reductor y Elevador

La Fig. 5 y Fig. 6 muestran la configuración y componentes necesarios para ensayar los convertidores CC-CC reductor y elevador, respectivamente. En ambos casos, se utiliza una pierna de uno de los módulos trifásicos conmutando el transistor inferior o superior, según corresponda, dejando el transistor complementario apagado durante el ensayo. Los demás transistores también permanecen apagados.

Para generar la señal PWM de activación de los transistores, se configura el módulo "PWM" desde Simulink® para que conmute el transistor correspondiente y el resto queden apagados. Además, se establece una frecuencia de conmutación constante y un ciclo de trabajo determinado en función de la tensión de salida deseada.

Los ciclos de trabajo para los convertidores reductor y elevador pueden determinarse a partir de las Ecs. (1) y (2) [15]

$$V_0 = V_d D \quad (1)$$

$$V_0 = V_d / (1 - D) \quad (2)$$

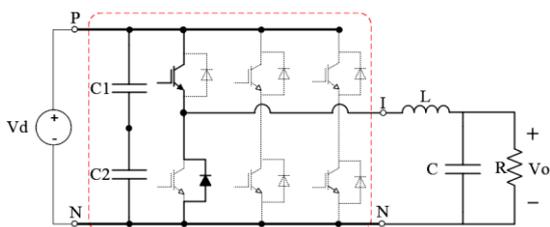


Fig. 5. Topología del convertidor CC-CC reductor

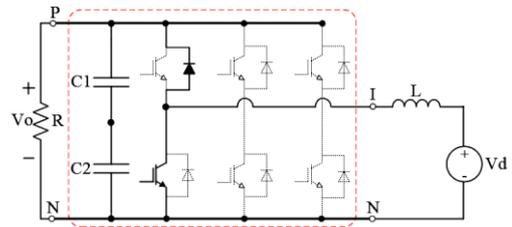


Fig. 6. Topología del convertidor CC-CC elevador

Los parámetros de los convertidores ensayados fueron $L = 88 \mu H$, $D = 0.5$, $f_s = 20 \text{ kHz}$ y $V_d = 30 \text{ V}$, de acuerdo con las Ecs. (1) y (2) se obtiene $V_0 = 15 \text{ V}$ para el reductor y $V_0 = 60 \text{ V}$ para el elevador. Las resistencias de carga se seleccionaron para operar ambos convertidores en el límite de conducción continua [15], resultando $R = 7 \Omega$ para el reductor y $R = 16 \Omega$ para el elevador.

En las Fig. 7 y Fig. 8 se muestran las formas de onda experimentales de los convertidores reductor y elevador, respectivamente; donde se muestran la señal PWM de activación, la forma de onda de la corriente del inductor, la tensión de salida y la tensión de alimentación, en los canales 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

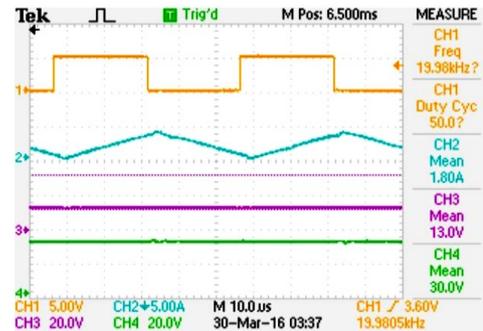


Fig. 7. Resultados del convertidor CC-CC reductor.

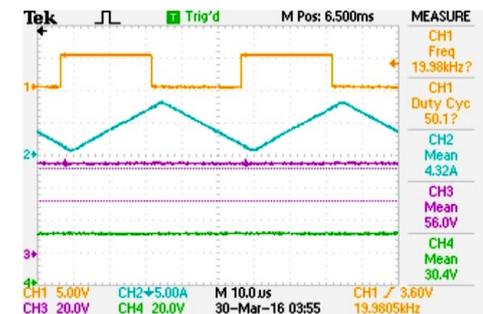


Fig. 8. Resultados del convertidor CC-CC elevador.

B. Convertidor CC-CC Puente Completo

La Fig. 9 muestra la configuración y componentes necesarios para configurar el banco como un convertidor CC-CC puente completo, el cual se utiliza para accionar un servomotor de CC.

Se utilizan dos piernas de uno de los módulos trifásicos. El transistor superior de una pierna y el inferior de la misma pierna, se encienden y apagan de manera complementaria.

La lógica de activación de los transistores de la primera pierna, se corresponde con la lógica negada para la activación de los transistores de la segunda pierna.

El servomotor de CC se conecta en los puntos medios de ambas piernas.

Este convertidor permite invertir la tensión y la corriente de salida, en función del ciclo de trabajo de los transistores de cada pierna, pudiendo invertirse el sentido de la de la velocidad de giro del servomotor de CC.

Este convertidor se ensayó con una tensión de alimentación $V_d=30$ V, siendo este valor la máxima tensión que puede aplicarse al servomotor utilizado.

En las Fig. 10 y Fig. 11 se muestran las formas de onda experimentales de la tensión y corriente de salida, en los canales 1 y 2 del osciloscopio, obtenidas para dos valores diferentes del ciclo de trabajo: 25% y 75%, respectivamente,

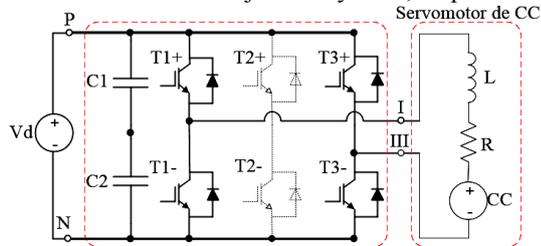


Fig. 9. Topología del convertidor CC-CC de puente completo

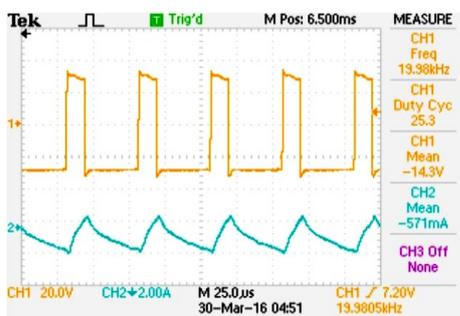


Fig. 10. Tensión y corriente de salida del convertidor CC-CC de puente completo con un ciclo de trabajo del 25%.

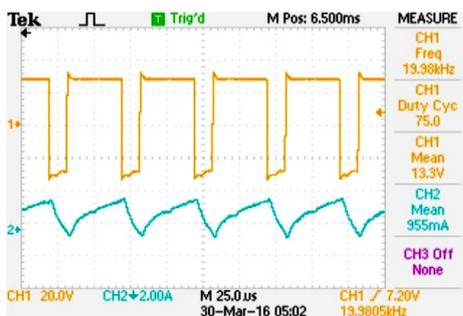


Fig. 11. Tensión y corriente de salida del convertidor CC-CC de puente completo con un ciclo de trabajo del 75%.

C. Convertidor CC-CC Resonante Serie Carga Serie

La Fig. 12 muestra la configuración y componentes necesarios para ensayar un convertidor CC-CC Resonante Serie, Carga Serie (CRSCS) [15].

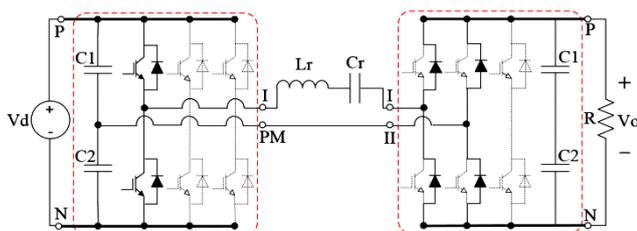


Fig. 12. Topología del convertidor CC-CC resonante serie.

El CRSCS posee una primera etapa de conversión CC-CA (implementado en el módulo M1), una etapa de CA de alta frecuencia intermedia en la cual se conectan el inductor (L_r) y el capacitor (C_r), que forman el circuito de filtro resonante, y una etapa final de conversión CA-CC (implementado en el módulo M2). Si el convertidor a ensayar requiere aislamiento galvánica, también puede conectarse un transformador en la etapa de CA de alta frecuencia intermedia.

El CRSCS posee tres modos de operación, con diferentes modos de conducción y conmutación de los semiconductores, los cuales dependen de la relación entre la frecuencia de conmutación, f_s , y la frecuencia de resonancia, f_0 . En este trabajo se muestran los resultados obtenidos para el modo de conducción continuo con $f_s > f_0$ [21].

Este convertidor se controla configurando desde Simulink® el bloque “PWM” para que conmuten los transistores de una de las piernas del módulo 1 con un ciclo de trabajo del 50%, y el resto de los transistores del banco queden apagados. La frecuencia f_s puede configurarse para que sea constante, o para que sea variable.

El CRSCS se ensayó para los parámetros $V_d=30$ V, $V_0=13,5$ V, $L_r=88$ uH, $C_r=1$ uF (lo que da una frecuencia de resonancia $f_0=17$ kHz), frecuencia de conmutación $f_s=19$ kHz y $R=7$ Ω.

La Fig. 13 muestra las formas de onda de la tensión alterna en los terminales I-PM de M1, la corriente del circuito resonante y la corriente y tensión de salida en los canales 1, 2, 3 y 4 del osciloscopio, respectivamente.

Puede observarse que la corriente por el inductor se encuentra en atraso de fase respecto a la tensión de CA.

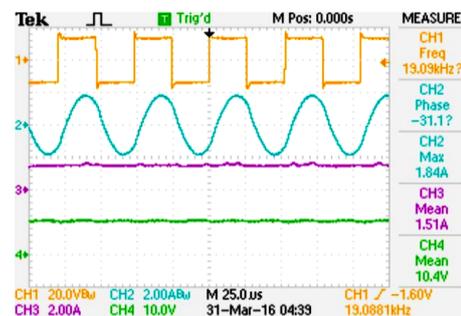


Fig. 13. Resultados del convertidor CC-CC resonante serie carga serie.

D. Inversor CC-CA Monofásico

La topología del convertidor CC-CC de puente completo indicada previamente (Fig. 9) también permite implementar un inversor monofásico de puente completo, esto se logra modificando la estrategia de modulación utilizada. Utilizando una estrategia de modulación seno-triángulo, la señal de control es una sinusoidal con la misma frecuencia que tensión de salida, a la frecuencia de la fundamental.

En este trabajo, se ensaya el convertidor utilizando dos estrategias de modulación: bipolar y unipolar [15].

Los parámetros del inversor que se ensayaron fueron los siguientes: tensión de alimentación CC $V_d=20$ V, $f_s=500$ Hz (para obtener una buena resolución en la imagen del osciloscopio cuando se realiza una FFT) y $f_1=50$ Hz (frecuencia de la señal de control).

En las Fig. 14 y Fig. 15 se muestran las formas de onda experimentales obtenidas para la modulación bipolar y unipolar, respectivamente; donde se muestran la tensión de

salida y la señal de control, en los canales 1 y 2 del osciloscopio.

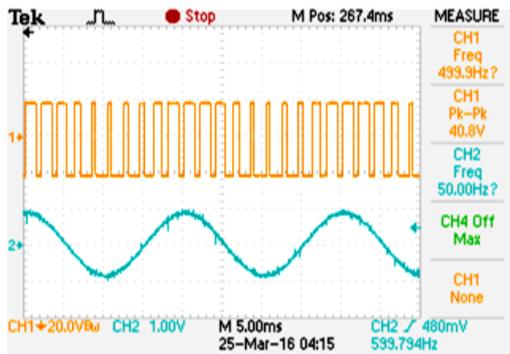


Fig. 14. Tensión de salida y tensión de control del inversor monofásico con modulación bipolar.

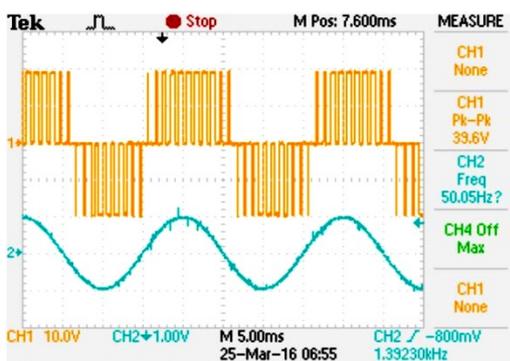


Fig. 15. Tensión de salida y tensión de control del inversor monofásico con modulación unipolar.

El espectro armónico de la tensión de salida para la modulación bipolar y unipolar se muestra en la Fig. 16 y en la Fig. 17 respectivamente.

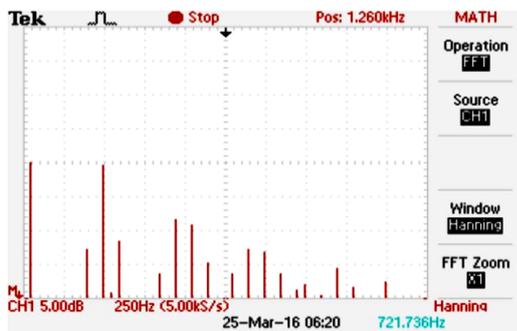


Fig. 16. Espectro armónico de la tensión de salida del inversor monofásico con modulación bipolar.

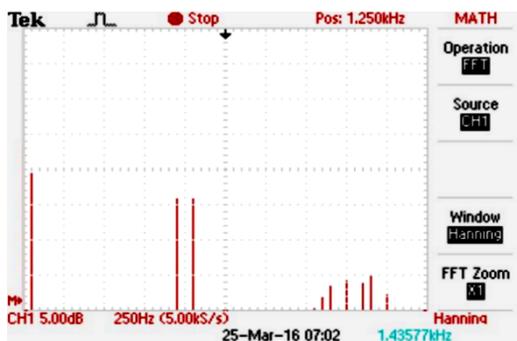


Fig. 17. Espectro armónico de la tensión de salida del inversor monofásico con modulación unipolar.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis, diseño e implementación de un banco didáctico que presenta como principal ventaja poder realizar todas las configuraciones de convertidores básicos de Electrónica de Potencia utilizando dos módulos trifásicos. El banco didáctico permite a los estudiantes obtener resultados experimentales para corroborar la teoría estudiada y validar sus cálculos y simulaciones.

Los cambios y elementos adicionales necesarios para ensayar los distintos convertidores son reducidos y en algunos casos solo es necesario cambiar la estrategia de conmutación desde Simulink®.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto (SeCyT, UNRC), el FONCyT de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y el Ministerio de Industria y Desarrollo Científico Tecnológico de la provincia de Córdoba (MICMDCT, Cba).

REFERENCIAS

- [1] M. H. Rashid. *Power Electronics Handbook*, 2nd ed. Elsevier Inc, 2007.
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky and T. Reinmann, *Application Manual Power Semiconductors*. SEMIKRON International, 2015.
- [3] E. Fuentealba, "La importancia de la Electrónica de Potencia". *Electricidad, la Revista Energética de Chile*, Jul. 2011.
- [4] F. Blaabjerg, A. Consoli, J. A. Ferreira and J. D. van Wyk, "The future of electronic power processing and conversion," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, pp. 3-8, Jan. 2005.
- [5] D.A. Torrey, "A project-Oriented Power Electronics Laboratory", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, May. 1994
- [6] V. M. Fiori and I. Barbi. "Módulo para experimentos em Eletrônica de Potência. Florianópolis. 1994.
- [7] J.M. Jimenez, F.Soto, E. de Jodar, J.A. Villarejo and J. Dorda "A New Approach for teaching Power Electronics converter experiments", *IEEE Transactions on Power Education*, vol. 48, Ago. 2005
- [8] S. Avila, E. López, G. Oggier y G. García, "Implementación de un banco de servomotores de cc con fines didácticos". in *AADECA 2010*, Ago. 2010.
- [9] J. Bossa, F. Serra y C. Falco, "Banco didáctico dedicado a la electrónica de potencia". in *AADECA 2006*, Ago. 2006.
- [10] G. Quaranta and P. Mantegazza. "Using Matlab-Simulink RTW to build real time control applications in user space with RTAI-LXRT". Realtime Linux Workshop Milano. 2001.
- [11] A. Klee. "Development of a motor speed control system using matlab and simulink, implemented with a digital signal processor". B.S. University of Central Florida. 2003.
- [12] R. Duma, P. Dobra, M. Abrudean and M. Dobra. "Rapid Prototyping of Control Systems using Embedded Target for TI C2000 DSP". In *Proc. 15th Mediterranean Conference on Control & Automation*, Jul. 2007.
- [13] M. Hoque, "Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering", *CC BY-NC-SA*. Chp.13. 2011.
- [14] I. Barbi and D. C. Martins, "Eletronica de Potencia. Conversores CC-CC Basicos Nao Isolados", Florianopolis, Brasil. 2001
- [15] N. Mohan, *Power Electronics. Converters, Application and Design*. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [16] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. 3ra ed. Prentice Hall, 2004.
- [17] "ACPL-337J data sheet", AVAGO Tech., California, United States
- [18] AVAGO Tech., "Desaturation Fault Detection", Tech. Rep. 5324, 2007.
- [19] (2015) The Texas Instruments website. [Online]. Available: <http://www.ti.org/>
- [20] Mathworks (2016) The Matlab documentation webpage on Mathworks [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/matlab>.
- [21] Elías Oggier, G.O. García; "Implementación de una Fuente de Alimentación CC-CC Resonante", in *RPIC 2015*, Oct.2015.