

# Modular Equipment for Implementation of Power Electronic Topologies

Daniel O. Garrido<sup>\*‡</sup>, Federico Rodríguez<sup>\*</sup>, Jonathan E. Bosso<sup>\*†</sup>, *Member, IEEE*,  
Germán G. Oggier<sup>\*</sup>, *Member, IEEE*, y Guillermo O. García<sup>\*</sup>, *Senior Member, IEEE*

<sup>\*</sup>Instituto de Investigaciones en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados (IITEMA) -  
Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), CONICET.  
Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

<sup>†</sup>Laboratorio de Control Automático (LCA), UNSL, CONICET.  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis (UNSL).  
Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

<sup>‡</sup>daniel.oscar.garrido@gmail.com

**Abstract**—This article presents a modular equipment that allows the implementation of single-phase or three-phase power electronics topologies for research applications. The designed equipment includes an interface to adaptation of signals that is compatible with Digital Signal Controllers (DSC) models TMS320F28377D and TMS320F28335. In addition, drivers compatible with uni-directional or bi-directional power devices were designed, and a Power Module that integrates on a single board the voltage and current measurement circuits, power devices, DC link (Direct Current) and capacitor bank. Finally, an example of implementation of a single-phase Dual Active Bridge (DAB) DC-DC converter is presented with its experimental results.

**Index Terms**—Power electronics, DSC, power devices, drivers, dual active bridges.

## I. INTRODUCCIÓN

Con la mayor penetración de las energías renovables en las matrices energéticas, se ve la necesidad de desarrollar nuevas estrategias para la operación y gestión de las redes eléctricas con el fin de mejorar su confiabilidad, eficiencia y calidad de la energía eléctrica, debido a las características intermitentes que poseen las fuentes de energía renovables, especialmente cuando constituyen una parte significativa de la capacidad total del sistema [1], [2]. Así surgen las microrredes eléctricas de CA (Corriente Alterna) o CC (Corriente Continua) que requieren tener capacidad de controlar el flujo de energía de manera bidireccional. Este control puede realizarse a través del uso de interfaces electrónicas de potencia adecuadas, como es el caso del transformador de estado sólido (SST, *Solid-State Transformer*), una tecnología emergente en el mundo [3], [4]. Por lo cual se ha impulsado el desarrollo de los convertidores de electrónica de potencia y los dispositivos semiconductores [5], [6].

La tecnología actual de semiconductores impone limitaciones para el diseño de convertidores en aplicaciones de media tensión (MT) o alta tensión (AT), donde se requieren enfoques de diseño que disminuyan los esfuerzos eléctricos en las llaves semiconductoras de potencia. Existen enfoques de diseño que incluyen la conexión en serie de llaves [7], los

convertidores multinivel [8], y modulares [9], [10], que dan origen a equipamientos complejos y de elevado costo.

En los laboratorios de electrónica de potencia es necesario abarcar la implementación de topologías de convertidores electrónicos de múltiples temas de investigación, y en aplicaciones de MT esto implica una gran cantidad de convertidores en conexión serie o en paralelo, según requisitos de tensión y corriente. Existen opciones comerciales de equipamiento de investigación y desarrollo en electrónica de potencia, que permiten realizar simulaciones en tiempo real (HIL, *Hardware In the Loop*) o implementar prototipos de laboratorio [11], [12], [13]. Sin embargo, estas opciones tienen un costo elevado y no siempre se ajustan a los requerimientos específicos de algunos laboratorios, o dificultan la vinculación entre equipamientos de diferentes marcas comerciales. En consecuencia, surge la necesidad en muchas universidades de diseñar e implementar equipamiento de laboratorio propio.

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un equipamiento modular de baja potencia para aplicaciones de investigación en laboratorios de electrónica de potencia. Este prototipo flexible para aplicaciones monofásicas o trifásicas, abarca el diseño de una interfaz para el controlador digital de señales (DSC, *Digital Signal Controller*), placas de circuitos de activación y placa de Módulo de Potencia. El diseño propuesto del Módulo de Potencia contiene en una única placa los circuitos de medición de tensión y corriente, las llaves semiconductoras (unidireccionales o bidireccionales), la barra de CC y el banco de capacitores. Si bien el módulo diseñado se puede utilizar en diversas topologías, en este trabajo se presenta la implementación del caso particular: convertidor CC-CC con puentes duales activos (DAB, *Dual Active Bridge*) monofásico, con sus resultados experimentales.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se presenta el equipamiento diseñado, compuesto por una etapa de control y una etapa de potencia. En la Sección III se describe un convertidor CC-CC con puentes duales activos (DAB) monofásico a modo de ejemplo de implementación del sistema diseñado, y se muestran resultados experimentales. Finalmente, en la Sección IV se presentan las

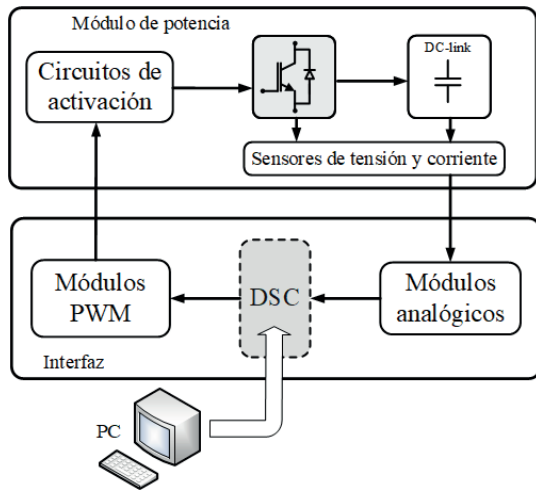


Fig. 1. Diagrama en bloques del sistema general.

conclusiones.

## II. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPAMIENTO DISEÑADO

En la Fig. 1 se muestra un diagrama en bloques del sistema general compuesto por una etapa de control y una etapa de potencia. La etapa de control esta compuesta por la interfaz que contiene al DSC y tiene vinculación con la PC (*Personal Computer*). La etapa de potencia esta compuesta por los circuitos de activación y el Módulo de Potencia.

### A. Etapa de Control

Dentro de esta etapa, la interfaz que se conecta físicamente al controlador DSC contiene los circuitos de adaptación de señales y protecciones, requeridos en la mayoría de las aplicaciones de electrónica de potencia. El diseño de la interfaz esta orientado a la familia de controladores C2000 de TI (*Texas Instruments*), y específicamente direccionado a los controladores TMS320F28377D y TMS320F28335, que pertenecen a la generación 3 y generación 2, respectivamente [14]. Estos DSC poseen una arquitectura específicamente diseñada para ser utilizados en aplicaciones de electrónica de potencia.

El diseño de la interfaz contempló una placa base y dos placas de expansión, cuyas características principales se resumen en la Tabla I. La placa base contiene una cantidad mínima de los módulos de salidas PWM (*Pulse-Width Modulation*), entradas y salidas analógicas, módulos de comunicación, y un pulsador y LED's de propósitos generales. Los módulos de comunicación disponibles en la placa base son: SPI (*Serial Peripheral Interface*), I2C (*Inter-Integrated Circuit*) y CAN (*Controller Area Network*). Las placas de expansión de PWM y ADC (*Analog-to-Digital Converter*), permiten aumentar la cantidad de canales PWM de salida y de entradas analógicas, en aplicaciones que así lo requieran como es el caso de convertidores multinivel y modulares. En la Fig. 2 se muestra una vista en tres dimensiones de las tres placas que conforman la interfaz diseñada.

Los módulos PWM tienen salida de tensión configurable en 3,3 V o 5 V, y son opto-acopladas. Los módulos analógicos

Tabla I  
CARACTERÍSTICAS INTERFAZ GEA 2019

Módulo	Cantidad	Características
Placa Base		
PWM	6	Tensión lógica en 3V3 o 5V, salida opto-acoplada
INA_TZ	8	ADC modo diferencial o <i>single-ended</i> , <i>offset</i> , FPB, <i>trip-zone</i>
DAC	3	FPB, seguidor de tensión
Comunicación	1	CAN (aislado, conector RJ45), SPI, I2C
LED	4	Indicadores de propósitos generales
<i>push-button</i>	1	Pulsador de propósito general
Placa de expansión PWM		
PWM	15	Tensión lógica en 3V3 o 5V, salida opto-acoplada
Placa de expansión ADC		
OPA_TZ	12	ADC modo diferencial o <i>single-ended</i> , <i>offset</i> , FPB, <i>trip-zone</i>
OPA	6	ADC modo diferencial o <i>single-ended</i> , <i>offset</i> , FPB
INA	6	ADC modo diferencial o <i>single-ended</i> , <i>offset</i> , FPB

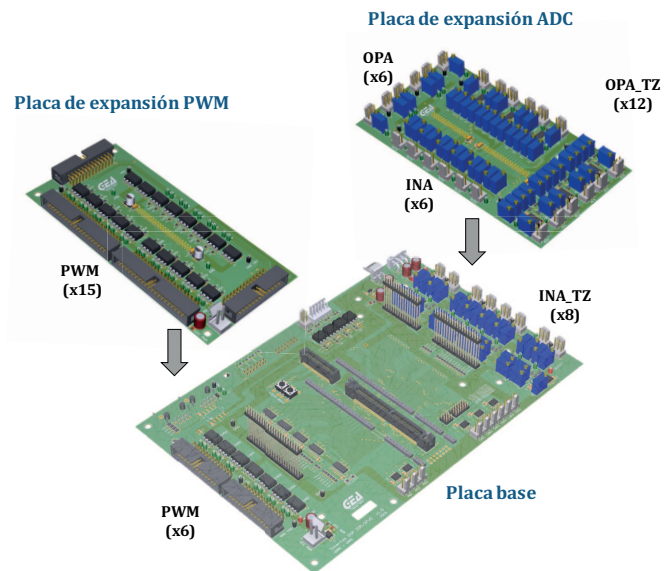


Fig. 2. Interfaz 2019 diseñada.

permiten entradas en modo diferencial o *single-ended* con nivel de tensión de *offset* y filtro pasa bajos (FPB). Además, algunos módulos analógicos cuentan con circuitos del tipo comparador ventana vinculados con las protecciones *trip-zone* del DSC. Cuando se utiliza el controlador TMS320F28377D, la placa base permite implementar tres salidas analógicas (DAC, *Digital-to-Analog Converter*) con FPB y seguidor de tensión.

### B. Etapa de Potencia

El diseño de esta etapa permite implementar diversas topologías e integra en una sola placa los circuitos de potencia de las llaves semiconductoras, la barra de CC (*DC-link*) con su banco de capacitores y los circuitos de medición de

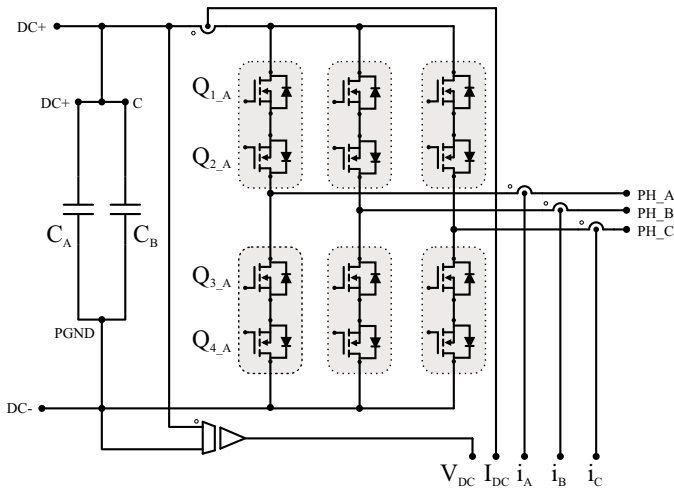


Fig. 3. Circuito esquemático genérico del Módulo de Potencia.

tensión y corriente. Este Módulo de Potencia contempla la posibilidad de conectar tres piernas de llaves unidireccionales o bidireccionales según la aplicación. Como se puede observar en el circuito esquemático genérico de la Fig. 3, cuando se activa la llave superior que está compuesta por los transistores  $Q_{1\_A}$  y  $Q_{2\_A}$  en configuración fuente común para cada pierna, la tensión del punto medio de esa pierna tendrá un valor igual al de la barra positiva (DC+), y si se activa la llave inferior que está compuesta por los transistores  $Q_{3\_A}$  y  $Q_{4\_A}$  en conexión fuente común, la tensión del punto medio tendrá un valor igual al de la barra negativa (DC-).

Mediante el Módulo de Potencia diseñado, es posible implementar convertidores CA-CC, CC-CA, CC-CC y CA-CA. Ya que las configuraciones posibles de llaves semiconductoras permiten obtener convertidores con topologías monofásicas o trifásicas, entre los cuales se encuentran:

- Rectificadores activos.
- Inversores.
- Puentes duales activos (DAB).
- Resonantes.
- CHB (*Cascaded H-Bridge*).
- QAB (*Quadruple Active Bridge*).
- Matriciales.
- Buck.
- Boost.

En cada Módulo de Potencia se mide la tensión  $V_{DC}$  de *DC-link*, la corriente de continua  $I_{DC}$  del puente, y las corrientes de cada fase ( $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$ ).

Por otro lado, el banco de capacitores está conformado por seis capacitores, como se puede observar en la Fig. 4, donde tenemos el paralelo de  $C_{11} // C_{13} // C_{15}$ , y el paralelo de  $C_{12} // C_{14} // C_{16}$ , que en la Fig. 3 están representados por  $C_A$  y  $C_B$ , respectivamente. Donde  $C_A$  y  $C_B$  se pueden vincular entre sí en paralelo (Fig. 3) para aumentar la capacidad, o en serie (Fig. 4) para elevadas tensiones de trabajo y además, se permite el acceso al punto medio del banco de capacitores. Estas configuraciones posibles del banco de capacitores se

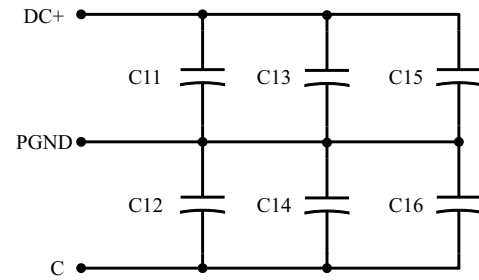


Fig. 4. Banco de capacitores del Módulo de Potencia.

obtienen mediante la correcta vinculación de los terminales de potencia DC+, DC-, PGND y C, que se muestran en las Figs. 3 y 4, donde se debe respetar la polaridad de los capacitores en cada tipo de conexión.

En la Fig. 5(a) se muestra una vista superior del Módulo de Potencia GEA 2019 diseñado, ensamblado con sus tres placas de circuitos de activación (Driver GEA 2019). En la parte izquierda de esta imagen se observan los conectores que vinculan las señales de esta placa con la interfaz del controlador, y en la parte derecha se observan los terminales de potencia.

En la Fig. 5(b) se muestra una vista inferior del Módulo de Potencia 2019, donde se observa en la parte izquierda la fuente de alimentación para los circuitos de medición y de las placas de circuitos de activación, en la parte central se encuentran las llaves semiconductoras del tipo encapsulado TO-247-3 con los sensores de corriente de las fases y en la parte derecha los capacitores de *DC-link*.

Para la medición de corriente se utiliza un circuito integrado ACS733 de Allegro, que es un sensor de corriente aislado de efecto Hall autocompensado, con un ancho de banda de 1 MHz y un rango de corriente de  $\pm 40$  A, con señal de salida en tensión. En la medición de tensión se utiliza el circuito integrado AMC1311B, que es un sensor de tensión aislado con señal de salida en tensión.

La integración en una sola placa de las llaves semiconductoras con el *DC-link* y los sensores de tensión y corriente, permite obtener un prototipo con una potencia máxima de 2 kW de bajo costo respecto a otras opciones. Anteriormente, en el laboratorio se utilizaban módulos de llaves semiconductoras, sensores LEM y grandes bancos de capacitores, siendo todos estos componentes de elevado volumen y costo cuando se requiere implementar convertidores modulares.

El diseño de esta etapa de potencia incluyó el desarrollo de los circuitos de *drivers* para activar de forma segura las llaves semiconductoras de potencia. Como se puede observar en la Fig. 6, se realizó el diseño de una placa que permite controlar dos o cuatro transistores según la aplicación requiera una pierna de llaves unidireccionales o bidireccionales, respectivamente. Se utilizó el circuito integrado ISO5852S, que provee protecciones de fallas por desaturación, bloqueo por subtensión (UVLO, *Undervoltage Lockout*) de entrada o de salida, y enclavamiento Miller durante el apagado de las llaves semiconductoras [15]. La alimentación de la etapa de salida

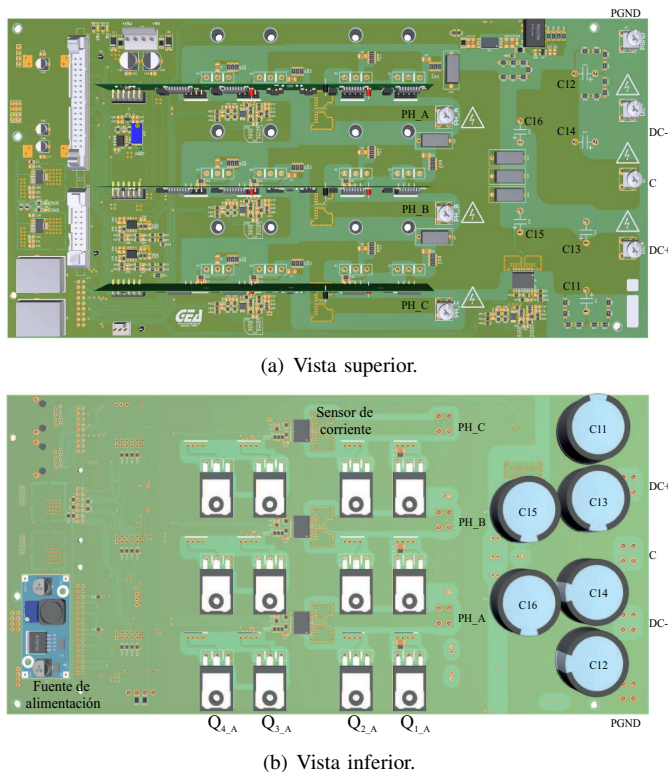


Fig. 5. Módulo de Potencia GEA 2019 diseñado.

de los circuitos de activación esta compuesta por una fuente aislada basada en el circuito integrado SN6505, con un transformador de alta frecuencia que tiene un bobinado primario y dos bobinados secundarios, uno para la llave superior y otro para la llave inferior de la misma pierna. Obteniendo mediante esta fuente aislada, una tensión de +15 V y de -5 V para el encendido y el apagado de las llaves semiconductoras de potencia, respectivamente. Dichas tensiones son valores típicos de encendido y apagado de llaves semiconductoras de silicio o de carburo de silicio (SiC, *Silicon Carbide*) [16], [17].

En la Fig. 7, se muestra una vista de la placa del circuito de activación diseñado, el cual se ensambla al Módulo de Potencia en forma vertical sobre las llaves semiconductoras, con el objetivo de reducir la longitud de las pistas de conexión y por ende disminuir las inductancias parásitas de las pistas de cobre [16].

### III. EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN: CONVERTIDOR CC-CC CON PUENTES DUALES ACTIVOS

En esta sección se describe en forma breve el principio de funcionamiento y los parámetros del prototipo experimental implementado para el caso particular de un convertidor CC-CC con puentes duales activos (DAB). Luego se muestran resultados experimentales que permiten comprobar el correcto funcionamiento de todos los circuitos diseñados.

#### A. Principio de funcionamiento

En la Fig. 8 se muestra un esquema simplificado de la topología del convertidor implementado a lazo abierto, donde

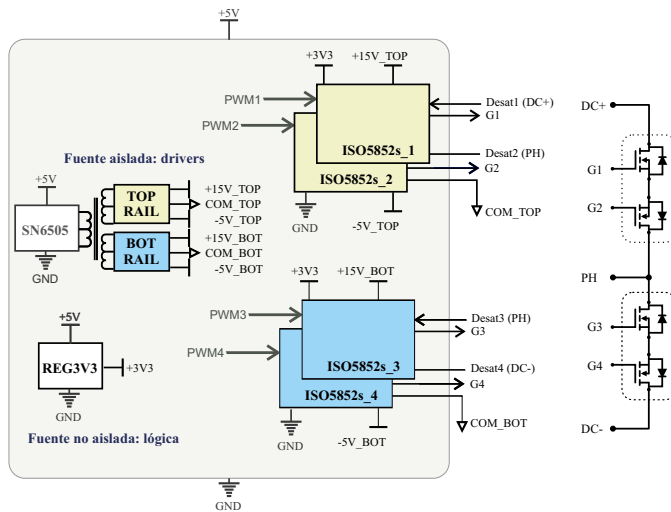


Fig. 6. Diagrama en bloques del circuito de activación.

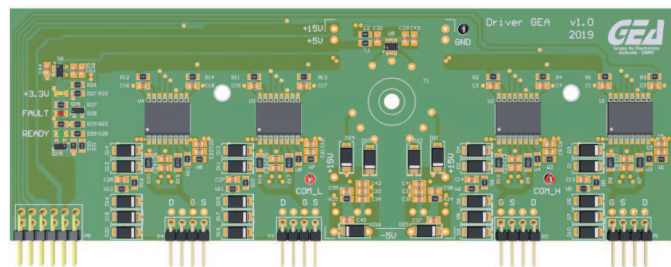


Fig. 7. Circuito de activación diseñado, Driver GEA 2019.

el usuario establece desde la PC el punto de operación del convertidor. Se utilizan dos placas de Módulo de Potencia para implementar el convertidor DAB, un módulo por cada puente activo.

Como puede observarse en el circuito de la Fig. 8, el puente  $P_1$  está alimentado por la fuente de tensión  $V_1$ . El mismo genera una tensión alterna,  $v_{P1}$ , que alimenta al bobinado  $B_1$  del transformador de alta frecuencia (TAF). La tensión  $v_{P2}$  del transformador es rectificada por un puente activo  $P_2$ . Cada una de las llaves semiconductoras,  $Q_{x,y}$ , consta de un transistor con su respectivo diodo en antiparalelo, donde  $x$  indica el número de llave de la pierna  $e$   $y$  identifica la pierna.

El análisis del convertidor DAB puede simplificarse refiriendo el modelo a un lado del transformador y considerando su inductancia magnetizante mucho mayor que su inductancia de dispersión [18]. Por lo tanto, la rama del circuito equivalente del TAF que contiene la inductancia magnetizante, se puede considerar como un circuito abierto, y el convertidor se puede representar mediante un esquema simplificado formado de dos puentes completos activos, conectados por la inductancia equivalente total  $L$  del TAF. En este trabajo se considera una relación de transformación igual a 1. Se utiliza una estrategia de modulación por desplazamiento de fase (PSM, *Phase Shift Modulation*) [18], la cual consiste en controlar cada uno de los puentes para generar una forma de

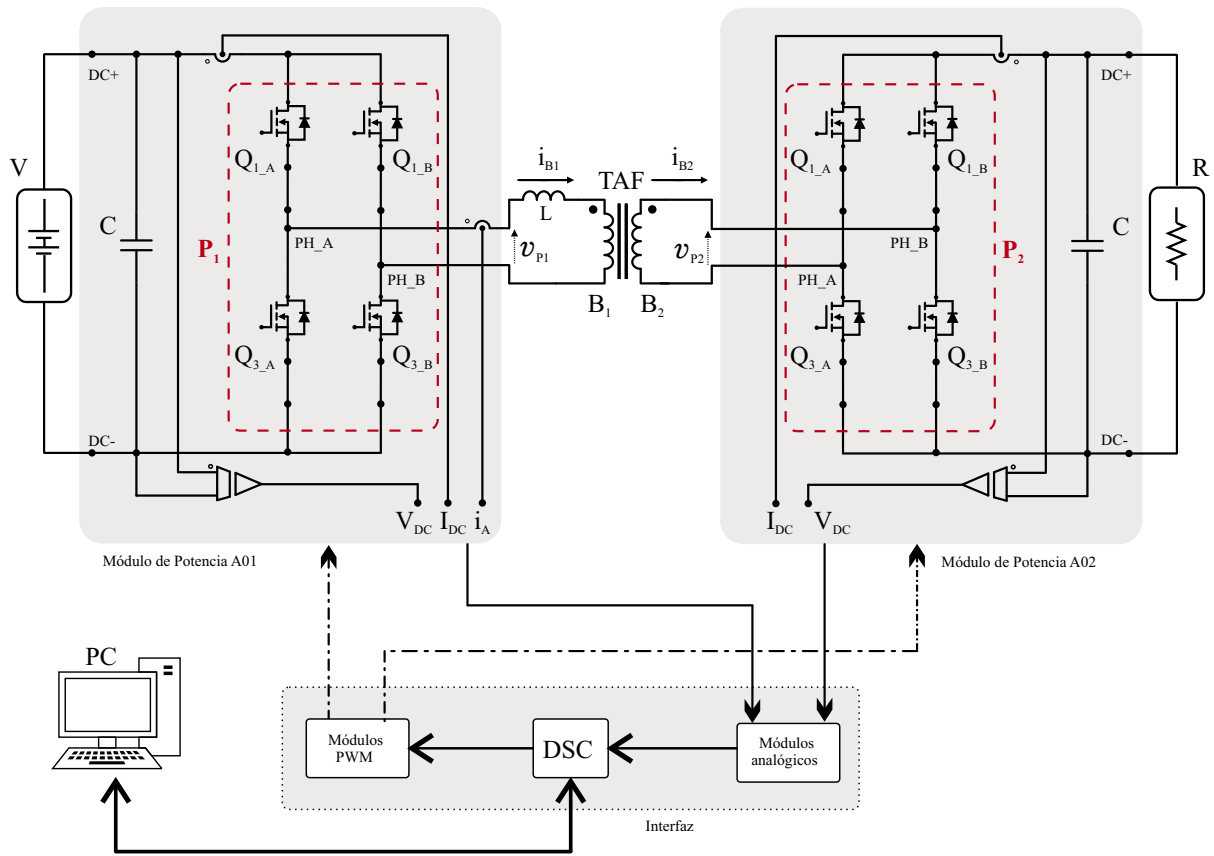


Fig. 8. Esquema general de la implementación de un convertidor CC-CC con puentes duales activos.

onda de tensión alterna de dos niveles de alta frecuencia, con 50% de ciclo de trabajo. La potencia media transferida se controla aplicando un desfase  $\delta$ , entre las tensiones  $v_{P1}$  y  $v_{P2}$  a bornes de los bobinados del transformador, como se expresa en la Ecuación (1):

$$P = \frac{V_1 V_2 \delta (\pi - |\delta|)}{\pi \omega L}, \quad (1)$$

donde  $V_1$  y  $V_2$  representan la tensión de CC en la fuente y en la carga, respectivamente,  $L$  es la inductancia equivalente total del transformador,  $\omega = 2\pi f_s$  y  $f_s$  es la frecuencia de conmutación [19].

### B. Características del convertidor implementado

Las principales características del convertidor implementado son: fuente de alimentación  $V_1$  de 100 V, carga resistiva de  $40 \Omega$ , frecuencia de conmutación  $f_s = 20$  kHz, inductancia equivalente total del transformador  $L = 220 \mu\text{H}$ , y llaves MOSFET modelo IPW65R110CFDA de 650 V de tensión de bloque y 31.2 A de corriente. En este convertidor se utilizó el controlador TMS320F28377D, que se puede observar en la Fig. 9 conectado a la interfaz implementada.

En la Fig. 10 se pueden observar los dos Módulos de Potencia que conforman el DAB, ubicados sobre un mismo disipador. En los terminales de potencia de cada banco de capacitores se utilizaron placas de cobre para minimizar las

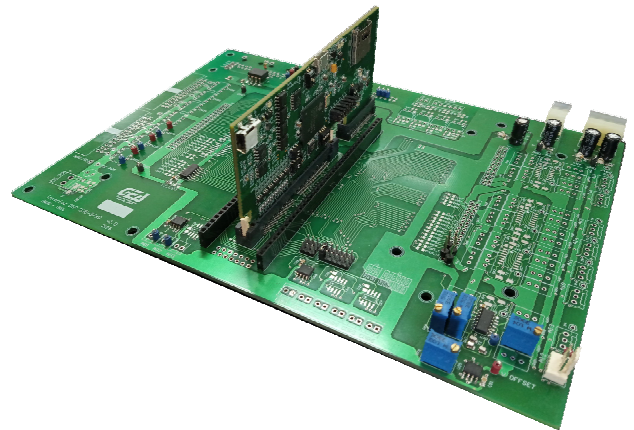


Fig. 9. Interfaz GEA 2019 implementada.

inductancias parásitas de conexión. Obteniendo una configuración en paralelo de todos los capacitores de la barra de CC, como se mostró en la Fig. 3.

### C. Resultados Experimentales

Se obtuvieron resultados experimentales de transferencia de potencia desde la fuente  $V$  de tensión  $V_1$  hacia la carga resistiva  $R$  de tensión  $V_2$ , como se observa en la Fig. 8. La

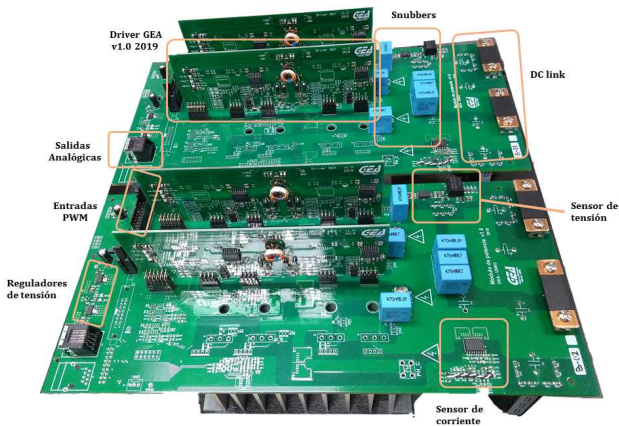


Fig. 10. Convertidor CC-CC con puentes duales activos implementado.

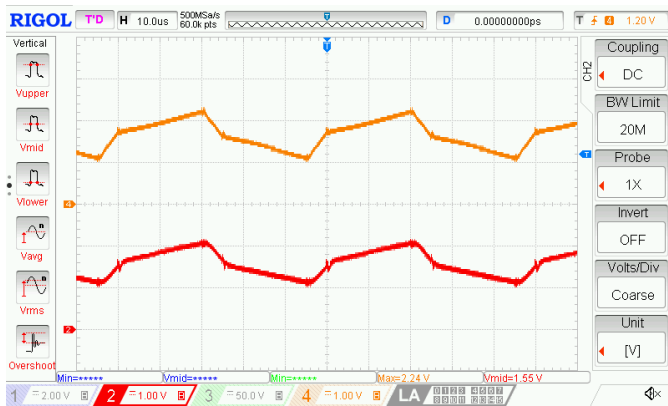


Fig. 11. Forma de onda de corriente en el inductor auxiliar para  $\delta = 30^\circ$ . CH4 (color naranja): sensor LEM. CH2 (color rojo): sensor Allegro.

inductancia equivalente total del transformador en el convertidor real es implementada mediante un inductor auxiliar. Para comprobar el correcto funcionamiento del circuito de medición de corriente en el inductor auxiliar, se procedió a contrastar su forma de onda de corriente  $i_L$  medida por el sensor Allegro integrado en el Módulo de Potencia y la medición externa de un sensor LEM modelo LA 55-P de 200 kHz de ancho de banda, con la medición provista por una punta de corriente KEYSIGHT 1146B de 100 kHz de ancho de banda.

En las Figs. 11 y 12, se muestra la medición de corriente  $i_L$  en el inductor auxiliar, cuando se aplica entre los puertos un desfase  $\delta$  de  $30^\circ$  y  $90^\circ$ , respectivamente. En estas dos figuras se muestra la forma de onda de medición de corriente del sensor LEM en el canal 4 (CH4) del osciloscopio, y del sensor Allegro en el canal 2 (CH2). Se puede observar que ambos sensores representan correctamente la forma de onda de corriente con una buena respuesta dinámica.

En la Fig. 13, se muestra la medición de corriente  $i_L$  cuando se aplica entre los puertos un desfase  $\delta$  de  $50^\circ$ . En esta figura se muestra la medición de la punta de corriente KEYSIGHT en el canal 2 (CH2) del osciloscopio, y del sensor Allegro en el canal 4 (CH4). Se puede observar que la punta de corriente no

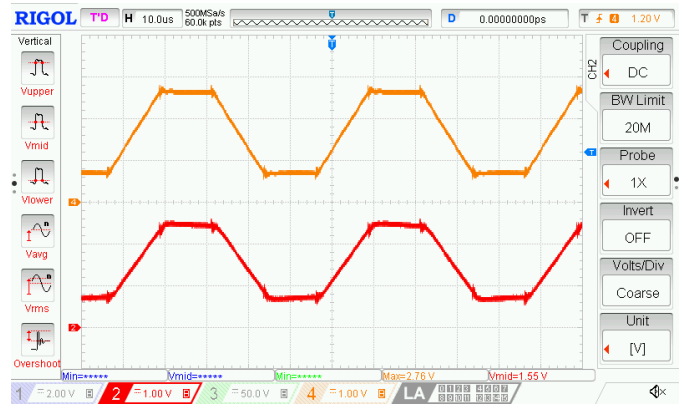


Fig. 12. Forma de onda de corriente en el inductor auxiliar para  $\delta = 90^\circ$ . CH4(color naranja): sensor LEM. CH2(color rojo): sensor Allegro.

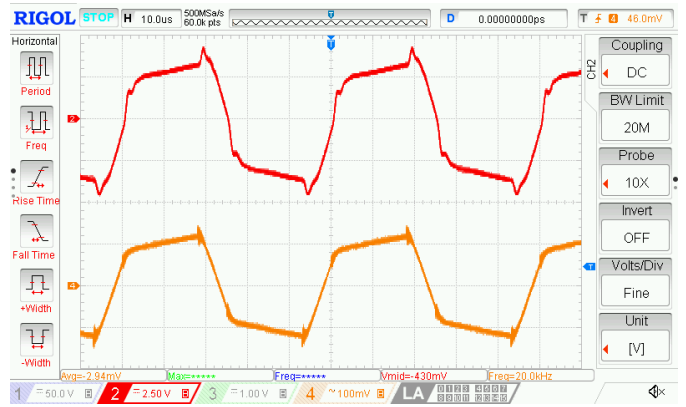


Fig. 13. Forma de onda de corriente en el inductor auxiliar para  $\delta = 50^\circ$ . CH2 (color rojo): punta de corriente KEYSIGHT. CH4 (color naranja): sensor Allegro.

puede representar fielmente la dinámica de la forma de onda, esto se debe a su menor ancho de banda en comparación con los sensores LEM y Allegro.

En la Fig. 14 se muestra un punto de operación del convertidor con desfase  $\delta$  de  $30^\circ$ . En el canal 1 (CH1) del osciloscopio se muestra la tensión de alterna  $v_{P1}$  del puente  $P_1$ , en el canal 2 (CH2) la tensión de alterna  $v_{P2}$  del puente  $P_2$ , en el canal 3 (CH3) y canal 4 (CH4) la tensión de alterna  $v_L$  y la corriente  $i_L$  en el inductor auxiliar, respectivamente.

En la Fig. 15 se muestra un punto de operación del convertidor con desfase  $\delta$  de  $35^\circ$ , y tensiones  $V_1$  de 74 V y  $V_2$  de 50 V. En el canal 1 (CH1) del osciloscopio se muestra la tensión  $v_{DS\_Q3\_A}$  a bornes de la llave  $Q_{3\_A}$  del puente  $P_1$ , en el canal 2 (CH2) la tensión de  $v_{DS\_Q3\_A}$  a bornes de la llave  $Q_{3\_A}$  del puente  $P_2$  y en el canal 4 (CH4) la medición del sensor LEM de la corriente  $i_L$  en el inductor auxiliar.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un equipamiento modular que permite implementar convertidores de electrónica de potencia para aplicaciones de investigación. Este diseño abarcó una etapa de control compuesta por una interfaz para el controlador

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto (SeCyT, UNRC), la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (FONCyT) a través del proyecto PICT 1663/2016, el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba a través del proyecto FONTEC 2018 "I + D de transformador de estado sólido para aplicaciones rurales" y la Red MEIHAPER CYTED.

## REFERENCIAS

- [1] "Renewable capacity highlights," International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020.
- [2] S. Borlase "Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions," CRC Press, 2013.
- [3] M. E. Adabi, and J. A. Martinez-Velasco, "Solid state transformer technologies and applications: A bibliographical survey," *AIMS Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 291–338, 2018.
- [4] M. A. Hannan, P. J. Ker, M. S. Hossain-Lipu, Z. H. Choi, M. S. A. Rahman, K. M. Muttaqi, and F. Blaabjerg, "State of the Art of Solid-State Transformers: Advanced Topologies, Implementation Issues, Recent Progress and Improvements," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19113–19132, 2020.
- [5] P. G. Arul, V. K. Ramachandaramurthy, and R. K. Rajkumar, "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, no. 0, pp. 597–608, 2015.
- [6] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, no. 0, pp. 785–807, 2015.
- [7] K. Vechalapu, S. Hazra, U. Raheja, A. Negi and S. Bhattacharya, "High-Speed Medium Voltage (MV) Drive Applications Enabled by Series Connection of 1.7 kV SiC MOSFET devices," in *2017 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE)*, Cincinnati, OH, 2017, pp. 808-815.
- [8] T. Gajowik, K. Rafał, and M. Malinowski, "Review of multilevel converters for application in solid state transformers," *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 93: pp. 1-5, 2017.
- [9] F. Briz, M. Lopez, A. Rodriguez and M. Arias, "Modular Power Electronic Transformers: Modular Multilevel Converter Versus Cascaded H-Bridge Solutions," in *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 4, pp. 6-19, 2016.
- [10] W. Chen, X. Ruan, H. Yan, and C. K. Tse, "DC/DC Conversion Systems Consisting of Multiple Converter Modules: Stability, Control, and Experimental Verifications," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 1463–1474, 2009.
- [11] OPAL-RT Technologies, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.opal-rt.com/>
- [12] Imperix, 2020. [En línea]. Disponible: <https://imperix.ch/>
- [13] Taraz Technologies, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.taraztechnologies.com/>
- [14] Texas Instruments, 2020. [En línea]. Disponible: <http://www.ti.com/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/overview.html>
- [15] Texas Instruments, 2020. [En línea]. Disponible: <http://www.ti.com/product/ISO5852S?keyMatch=ISO5852&tisearch=Search-EN-everything&usecase=part-number>
- [16] J. Rice and J. Mookken, "SiC MOSFET gate drive design considerations," in *2015 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP)*, Chicago, IL, 2015, pp. 24-27.
- [17] Texas Instruments, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.ti.com/tool/TIDA-00195>
- [18] R.W. De Doncker, D.M. Divan, and M.H. Kheraluwala, "A threephase soft-switched high-powerdensity dc/dc converter for high-power applications," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 27, no. 1, pp. 63–73, 1991.
- [19] G. G. Oggier, G. O. García, and A. R. Oliva, "Switching Control Strategy to Minimize Dual Active Bridge Converter Losses," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 24, No 7, pp. 1826-1838, Jul. 2009.

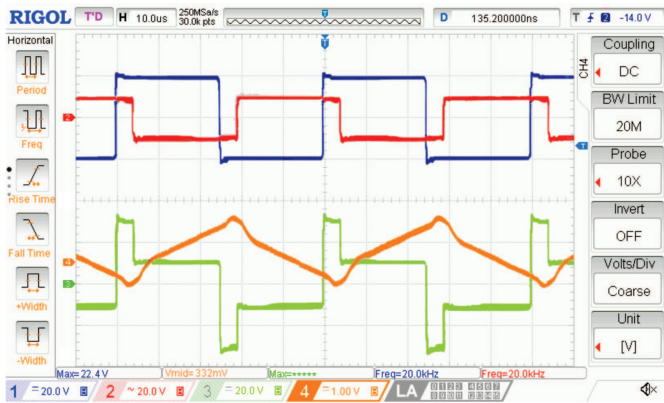


Fig. 14. Formas de onda implementación del DAB. CH1 (color azul): tensión  $v_{P1}$ . CH2 (color rojo): tensión  $v_{P2}$ . CH3 (color verde): tensión  $v_L$ . CH4 (color naranja): corriente  $i_L$  sensor Allegro.



Fig. 15. Formas de onda implementación del DAB. CH1 (color azul): tensión  $v_{DS\_Q3\_A}$  del puente  $P_1$ . CH2 (color rojo): tensión  $v_{DS\_Q3\_A}$  del puente  $P_2$ . CH4 (color naranja): corriente  $i_L$  sensor LEM.

DSC, la cual es compatible para la generación 2 y 3 de la familia C2000 de controladores digitales de Texas Instruments. En particular el diseño se direccionó a los DSC modelos TMS320F28377D y TMS320F28335. La etapa de potencia del diseño contempló dos circuitos impresos: un Módulo de Potencia que integra los circuitos de las llaves semiconductoras de potencia, una barra de CC con su banco de capacitores, y los circuitos de medición de tensión y corriente; y un circuito de drivers para activar de forma segura las llaves semiconductoras.

Finalmente se presentó un ejemplo de implementación de un convertidor CC-CC con puentes duales activos (DAB), donde se transfirió potencia desde una fuente de alimentación hacia una carga resistiva y se analizaron las formas de onda de mayor interés. Esta implementación permitió verificar el correcto funcionamiento de todos los circuitos diseñados a partir del control a lazo abierto de puntos de operación del convertidor.