

Convertidor electrónico multipropósito para la enseñanza de la electrónica de potencia

Pablo Amoedo
Cátedra de Electrónica de Potencia
Universidad Nacional de Rosario
 Rosario, Argentina
 amoedo@fceia.unr.edu.ar

Sergio Junco
Lab. de Automatización y Control
Universidad Nacional de Rosario
 Rosario, Argentina
 sjunco@fceia.unr.edu.ar

Daniel Alba
Lab. de Automatización y Control
Universidad Nacional de Rosario
 Rosario, Argentina
 alba@fceia.unr.edu.ar

Mónica Romero
Cátedra de Electrónica de Potencia
Universidad Nacional de Rosario
 Rosario, Argentina
 mromero@fceia.unr.edu.ar

Andrés Vazquez Sieber
Cátedra de Electrónica de Potencia
Universidad Nacional de Rosario
 Rosario, Argentina
 andres_vazquez_sieber@yahoo.com.ar

Abstract— La enseñanza de la Electrónica de Potencia que involucra dispositivos semiconductores de corte y conducción controlada involucra en su etapa inicial el estudio de distintos convertidores como lo son los de cc-cc (boost, buck), cc-ca (inversores modulados por ancho de pulso) y ca-cc (rectificadores modulados por ancho de pulso). El desarrollo de experiencias prácticas (tipo ‘hands-on’) sobre este tipo de topologías implica en general la utilización de un equipo que para cada una de las configuraciones anteriormente mencionadas. El presente artículo presenta un convertidor electrónico multipropósito que puede ser utilizado como plataforma de hardware para la enseñanza práctica de la Electrónica de Potencia, implementando en un mismo hardware las anteriores topologías, tanto en sus versiones monofásicas como trifásicas, mediante la programación de su unidad digital de control y la conexión opcional de elementos pasivos externos.

Keywords — Conversión eléctrica, Electrónica de Potencia, hardware para educación, actividades de laboratorio.

I. INTRODUCCIÓN

En el proceso de aprendizaje de la Electrónica de Potencia, el estudio de dispositivos semiconductores de corte y conducción controlada [1] es clave. Estos dispositivos constituyen una parte esencial en las distintas topologías de conversión cc-cc, ca-cc y cc-ca. Las configuraciones básicas que se presentan son la buck, boost y flyback para conversión cc-cc, mientras que el puente H completo (para aplicaciones monofásicas) y el puente trifásico completo suelen ser utilizados como ejemplos para conversión cc-ca y ca-cc.

Este tipo de configuraciones son presentadas a los estudiantes funcionando en condiciones ideales, es decir dispositivos semiconductores ideales y operando en régimen permanente. Bajo estas condiciones de trabajo se obtiene la tensión de salida de los convertidores como una función del ciclo de trabajo. También se analiza la influencia de las variaciones de carga, de la tensión de entrada y de algunos parámetros del circuito. Este estudio se lleva a cabo en general pensando que el convertidor opera a lazo abierto y en régimen permanente.

Para estudiar el comportamiento dinámico de los convertidores se hace necesario obtener un modelo de este, que en general se lleva a cabo mediante técnicas de promediación [2]. Con esta técnica se obtiene un modelo continuo lineal que permite el análisis dinámico de

convertidores con las herramientas conocidas de la teoría de sistemas, tales como: funciones transferencia, diagramas de bloques, lugar de las raíces, variables de estado y diagramas de Bode.

A partir del modelo dinámico es posible diseñar y sintetizar una ley de control que permita al convertidor alcanzar una consigna deseada siguiendo algún criterio de desempeño prefijado, así como la posibilidad de rechazar perturbaciones.

La etapa de síntesis de los controladores y su implementación es de sumo interés dado que involucra muchos conceptos provenientes de otras ramas de la electrónica (y que en general pertenecen a los contenidos de otras asignaturas de grado dentro de la carrera) como: Teoría de Señales y Sistemas, Teoría de Control, Técnicas digitales y Electrónica Lineal.

Una etapa complementaria y muy importante del proceso de aprendizaje consiste en la ejecución de actividades de laboratorio asociadas a los contenidos presentados. Esta etapa de experimentación tiene una fase de verificación de los conceptos teóricos en convertidores, permitiendo el acceso a variables internas y operando a niveles de potencia adecuados por cuestiones de seguridad, tanto para las personas que lo operan como para el instrumental y el hardware complementario que se requiera.

En la actualidad, los estudiantes que inician los cursos de Electrónica de Potencia en la Universidad Nacional de Rosario realizan actividades de laboratorio de visualización de tensiones y corrientes sobre convertidores ya construidos. Estas topologías se encuentran implementadas por medio de circuitos integrados (CC.II.) de aplicaciones específicas que incluyen:

- Una referencia de tensión, pudiendo ser integrada o externa.
- Un pin de realimentación de tensión de salida.
- Elemento de potencia (pudiendo tratarse de uno o más transistores).

Desde un punto de vista didáctico, la utilización de este tipo de convertidores limita en cierta medida el aprendizaje de la Electrónica de Potencia de acuerdo con los puntos que se resumen a continuación:

- Los CC. II. sólo pueden ser utilizados para una topología en particular. Esto obliga a contar con múltiples equipos, en donde cada uno de estos desarrollará una aplicación.
- El diseño del convertidor queda sujeto a las indicaciones de la hoja de datos del CC.II. utilizado, limitando así la aplicación de los conceptos aprendidos.
- El control implementado por los CC.II. de aplicaciones específicas es analógico y, por ende, inalterable. Esto impide la implementación de controladores específicos.

A los anteriores puntos se agrega el desaprovechamiento de la riqueza conceptual y práctica que tiene la Electrónica de Potencia, entendiéndola como una rama sumamente integral de la electrónica ya que aborda:

- Dispositivos semiconductores.
- Teoría de sistemas y señales.
- Teoría de control aplicada.
- Electrónica lineal.
- Electrónica digital.

En función de los anteriores puntos, se decide reemplazar a la utilización de convertidores con CC. II. de aplicación específica por una plataforma de hardware experimental que reúna las siguientes especificaciones:

- Multipropósito, de forma tal que el equipo pueda ser usado en cualquiera de las topologías presentadas.
- Digital, permitiendo la síntesis y diseño de distintos tipos de controladores para cada topología.
- Autocontenido, contando con todas las mediciones necesarias (tensiones y corrientes) y sus sistemas de acondicionamiento correspondientes, evitando el diseño y construcción de placas de circuito impreso externas.

Elementos pasivos necesarios para cada topología de conversión, tales como inductancias o capacitores, son conectados en forma externa al convertidor por medio de bornas accesibles.

El proceso de diseño del equipo desarrollado arroja como resultado al convertidor electrónico multi-propósito (CEMP). Éste es presentado en la sección siguiente.

II. CONVERTIDOR ELECTRÓNICO MULTI-PROPÓSITO

La presente sección describe las partes fundamentales del convertidor desarrollado [3].

El convertidor fue inicialmente diseñado como plataforma de hardware para la implementación de los distintos tipos de conversión eléctrica que se presentan en una microrred eléctrica híbrida [4]. A raíz del nuevo uso didáctico del equipo, se introdujeron una serie de modificaciones sobre el equipo presentado en esta publicación:

- Reducción del tamaño del disipador, en vista de que no se requiere un equipo con la capacidad (en kVA) contemplada para los equipos de conversión de energía.
- Inclusión de un puente rectificador no controlado (diodos) que permita la alimentación del bus de cc a partir de la red eléctrica de ca.
- Inclusión de una bornera de conexión externa a la placa de circuito impreso, teniendo como objetivo reducir el desgaste de la conexión y desconexión de conductores en los sucesivos usos del equipo.
- Programación del DSP para la ejecución de las distintas aplicaciones, en operación a lazo abierto.
- Desarrollo de una interfaz gráfica web que permita la utilización del convertidor en múltiples aplicaciones.

A. Etapa de potencia

La etapa de potencia del CEMP está constituida por un puente trifásico de transistores IGBT. La estructura circuital se presenta en la Fig. 1.

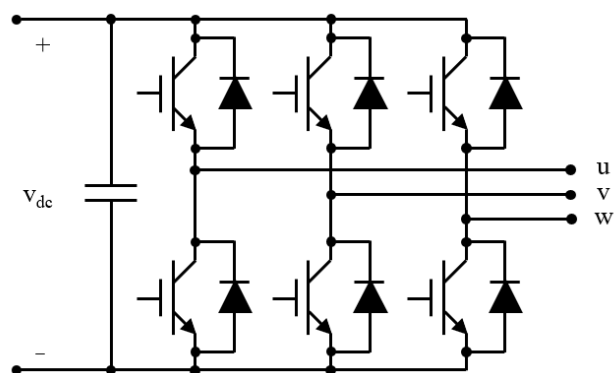


Fig. 1. Etapa de potencia del convertidor electrónico desarrollado

Desde un punto de vista práctico se considera en el diseño la utilización de un *intelligent power module*. Este tipo de circuito integrado de potencia concentra en un único encapsulado la etapa de potencia (transistores y diodos *freewheel*) así como los circuitos de disparo de los transistores y otras funciones de utilidad, como ser protecciones de cortocircuito y medición de temperatura.

El circuito integrado utilizado es el Powerex PS21A79. Se trata de un módulo de 600V, 50A cuya vista se presenta en la Fig. 2.

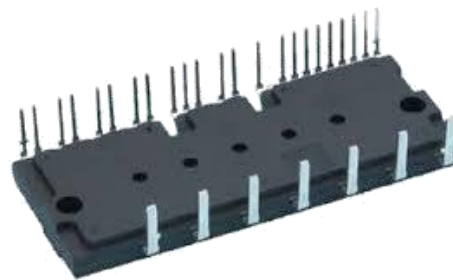


Fig. 2. Vista del chip de potencia PS21A79, de Powerex.

La utilización de este tipo de circuitos integrados de potencia aporta ciertos beneficios, como ser la simplicidad del disparo de los transistores y la reducción del tamaño del convertidor de potencia.

Un bus de cc y tres fases (genéricamente designadas como u , v y w) constituyen los puertos de potencia del convertidor. Esto es gráficamente presentado en la Fig. 3 en vista de que será utilizado con frecuencia en las próximas secciones del artículo para describir las distintas aplicaciones del convertidor. Un cuarto puerto, denominado $dc-$, corresponde al polo negativo del bus de cc.

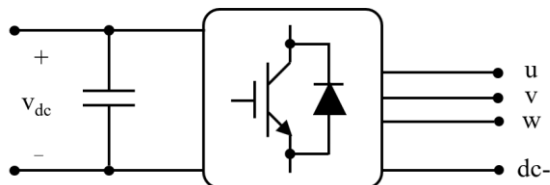


Fig. 3. Puertos de potencia del CEMP.

Las fases u , v y w pueden procesar tanto variables de ca como de cc, en tanto que el bus de cc sólo admite la operación con variables de cc según la polaridad indicada en la Fig. 3. El bus de cc también incluye capacitores ya montados en el convertidor.

Nótese que no se califica a ninguno de estos puertos como de entrada o de salida, en virtud de que la estructura del convertidor permite una operación bidireccional en lo que respecta al flujo de potencia activa. Esto último aplica tanto para las conversiones cc-cc así como ca-cc implementadas por el CEMP. La etapa de potencia utilizada es comúnmente denominada en la literatura técnica como *voltage source converter* [5], en función de que el bus de cc puede interpretarse – en el intervalo de tiempo de la modulación por ancho de pulso – como una fuente de tensión constante por la presencia de los capacitores.

B. Unidad de control digital

La unidad de control digital del CEMP está compuesta por una placa TMDSCNCD28335, de Texas Instruments. Se trata de una placa de desarrollo, cuyos pines son accesibles por medio de un zócalo DIMM100. Contiene un procesador digital de señales (DSP) TMS320F28335, de Texas Instruments, de 32bits y 150MIPS.



Fig. 4. TMDSCNCD28335 controlCARD.

El microcontrolador puede ser programado *on-board* mediante un conector USB y un computador. Esto último será ampliado en la sección de comunicaciones.

El DSP incluye periféricos que pueden utilizarse para el desarrollo de distintas tareas asociadas a la aplicación del convertidor. Entre éstos se destacan:

- Modulador de ancho de pulso (PWM), el cual tendrá como función el control de los transistores de potencia que componen el convertidor. Las salidas de este módulo se encuentran directamente conectado a las señales de disparo del chip de potencia.
- Temporizadores, utilizados como base de tiempo para la ejecución de tareas y/o interrupciones en forma sincrónica.
- Conversor analógico – digital (ADC), los que tendrán como objetivo realimentar al controlador las variables eléctricas a controlar y/o monitorear.
- Comunicación CAN, para la aplicación de un sistema que permita la intercomunicación entre distintos convertidores o el control bajo un sistema de jerarquía superior.
- Periférico QEP para la conexión directa de encoders incrementales. Esto permite la utilización del convertidor para el control eléctrico de motores con realimentación de velocidad mecánica de giro.

La unidad de control digital deberá ser programada por el usuario de acuerdo con la aplicación a ejecutar.

C. Mediciones analógicas

Las mediciones analógicas de tensión y corriente son necesarias a los efectos de poder ejecutar sobre el microcontrolador un control a lazo cerrado del convertidor.

La Fig. 5 presenta – en forma simplificada – el procesamiento de las variables eléctricas realimentadas al microcontrolador.



Fig. 5. Procesamiento de las variables analógicas realimentadas

Las variables eléctricas son primeramente ingresadas a un transductor. Este tiene como objetivo atenuar la magnitud de la variable procesada y transformarla – en forma proporcional – en una tensión o corriente cuya amplitud pueda ser procesada por un circuito de acondicionamiento lineal de baja tensión (3,3V).

El convertidor contempla distintos transductores que pueden utilizarse para la realimentación de señales, tales como:

- Sensores de efecto Hall a lazo abierto para la medición de corriente por las fases u , v y w .
- Sensores de efecto Hall a lazo cerrado para la medición de corrientes externas.
- Transformadores de potencial y de corriente (sólo aplicable a puertos operando en ca).
- Resistencias shunt.
- Divisores / Atenuadores resistivos.

El operador del convertidor puede seleccionar la metodología de medición según sea la aplicación. Algunos de estos transductores se encuentran fijos en el convertidor, mientras que otros pueden emplazarse fuera de él de forma de realimentar señales externas.

El segundo paso en la cadena de acondicionamiento de señal es el acondicionamiento estático de la señal provista por el transductor. Esta etapa tiene objetivo ajustar el rango de medición de la señal (según sean las especificaciones de diseño del convertidor) al rango de conversión del ADC, el cual es de 0 a 3V [6].

En el caso de las mediciones que procesan variables de ca, esta etapa también se encuentra a cargo de la aplicación de una polarización permanente de mitad de escala del ADC, en 1,5V.

La tercera etapa en el procesamiento de las señales de realimentación es el acondicionamiento dinámico. Esta acción tiene como objetivo reducir el ancho de banda de la variable medida de forma de evitar la presencia de *aliasing* al llevar a cabo la conversión analógica - digital. En todos los casos, el filtro aplicado sobre las mediciones es de tipo pasabajos.

La etapa de procesamiento dinámico debe ser cuidadosamente diseñada en función del contenido armónico de las señales a registrar y los sistemas de control a desarrollar. Un ejemplo claro de esto se observa en aplicaciones en donde el convertidor se debe conectar – por medio de sus fases u , v , w – a la red eléctrica. Esta aplicación requiere ejecutar la sincronización de la red por medio de un lazo de fijación de fase (PLL). Esto consiste en la estimación instantánea de la magnitud, frecuencia y ángulo de la tensión de la red eléctrica. Un eventual error de ángulo – causado por un ancho de banda reducido en las mediciones analógicas de tensión – puede ocasionar retardos que dificulten (e incluso imposibiliten) el intercambio de energía entre la red y el convertidor.

Por último, la señal debidamente filtrada es ingresada al pin del ADC del DSP. El ADC tiene un rango de conversión de 0 a 3V, con una resolución de 12 bits. La frecuencia de muestreo del ADC puede ser libremente definida por la configuración del programa bajo ejecución.

D. Comunicaciones

El CEMP cuenta con dos sistemas de comunicaciones.

El primero de ellos es la comunicación del DSP con una computadora por medio de un protocolo USB - JTAG. Este puerto de comunicaciones permite la programación *on-board* del DSP desde el software Code Composer Studio. Este es un software provisto por Texas Instruments para la programación de toda su familia de microcontroladores.

Además de la programación, el protocolo permite la depuración de los programas en tiempo real, permitiendo la inserción de *breakpoints*, visualización y modificación directa de variables y/o registros, entre otros.

El segundo puerto de comunicaciones del CEMP utiliza un protocolo CAN. Este puerto es inicialmente incluido para permitir la comunicación entre los distintos convertidores electrónicos que componen una microrred eléctrica.

E. Desarrollo final

Una fotografía del CEMP se presenta en la Fig. 6. Esta versión del equipo es denominada como *full-power*, en función de que cuenta con un disipador de aluminio que

permite alcanzar los valores nominales declarados. Esta versión del equipo es utilizada en la Universidad Nacional de Rosario como unidad de conversión para los elementos de generación y/o almacenamiento de una microrred eléctrica híbrida emplazada en el Laboratorio de Automatización y Control.



Fig. 6. Vista superior del CEMP, versión *full-power* para microrred.

Una segunda fotografía del CEMP se presenta en la Fig. 7. Esta es una versión *lite* utilizada para la enseñanza de topologías de convertidores. Esta versión cuenta con una potencia nominal menor en función de que el disipador de aluminio es reemplazado por un soporte metálico. Una bornera de acceso externa es utilizada para evitar el desgaste de las borneras del convertidor ocasionado por el uso del equipo en distintas actividades curriculares.



Fig. 7. Vista lateral del CEMP, versión *lite* para enseñanza de topologías de conversión.

El convertidor está compuesto por dos placas interconectadas entre sí:

- *Placa de control* (superior), en la que se ubican los elementos de acondicionamiento analógico, los sistemas de comunicaciones y la unidad digital de control.
- *Placa de potencia* (inferior), en donde se encuentran el chip de potencia, el bus de cc y la fuente de alimentación.

F. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas nominales del CEMP se resumen en la TABLE I. Se aclara que dichas especificaciones aplican a la versión *full-power*.

TABLE I. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CEMP

Especificaciones técnicas		
Variable	Mínimo	Máximo
Potencia nominal (@ $f_{PWM} = 5\text{kHz}$)	-	5.3kVA
Tensión de bus de cc	15V	350V
Tensión de fases u, v y w (cc)	0V	350V
Tensión de fases u, v y w (ca)	0 V_{RMS}	220 V_{RMS}
Corriente de fases u, v y w (@ $f_{PWM} = 5\text{kHz}$)	-	13.8 A_{RMS}
Frecuencia de modulación	5kHz	20kHz

Un resumen de las distintas mediciones disponibles por el convertidor se presenta en la TABLE II. Todas ellas están disponibles por el operador del equipo según sea la aplicación por desarrollarse.

TABLE II. MEDICIONES ANALÓGICAS DISPONIBLES

Mediciones analógicas disponibles		
Variable	Ubicación	Transductor utilizado
Corriente	Bus de cc	Shunt
	Batería	Shunt
	Fases u, v y w	Sensor de efecto Hall
	Fases u, v y w (externas)	Sensor de efecto Hall a lazo cerrado / Transformador de corriente
	Source de transistor inferior	Shunt
Tensión	Bus de cc	Divisor resistivo
	Fases u, v y w	Divisor resistivo
	Fases u, v y w (externas)	Transformador de tensión

G. Convertidores similares comercialmente disponibles

Existen diferentes proveedores de convertidores que ofrecen soluciones similares a las del convertidor electrónico multipropósito [7] [8] [9].

A continuación se listan los distintos puntos evaluados a partir de la información disponible según cada fabricante.

- Tecnología: existen convertidores conmutados con tecnología IGBT y SiC.
- Uso: la mayoría de los proveedores coinciden en la utilización de sus convertidores para proyectos de enseñanza, investigación y prototipado de convertidores.
- Capacidad: la capacidad (en kVA) de los equipos comercialmente disponibles comprende mayormente soluciones desde 2kVA hasta 60kVA.
- Estructura de potencia: se encuentran disponibles soluciones de convertidores trifásicos de dos niveles (como la presentada en la Fig. 1) y tres

niveles (configuración *neutral point clamped*, NPC). También es posible encontrar configuraciones monofásicas, como puente H semicompleto y completo [8].

- Modularidad: algunos proveedores ofrecen por separado a la etapa de potencia de la unidad de control. Esto permite cierta flexibilidad para el desarrollo de distintas estructuras de potencia.

III. APLICACIONES DEL CONVERTIDOR EN LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Esta sección presenta las cuatro aplicaciones básicas que el convertidor puede ejecutar según sea el programa cargado en su DSP:

- cc-cc (buck)
- cc-cc (boost)
- ca-cc (rectificador PWM)
- cc-ca (inversor PWM)

Es importante aclarar de antemano que las aplicaciones aquí presentadas entran dentro de la categoría de convertidores de corte y conducción controlada. Estas se caracterizan por la utilización de transistores, cuyo estado de conducción y de corte está directamente asociado al estado lógico de la señal de compuerta aplicada. Esta señal es generada por la unidad digital de control y en todos los casos es una señal digital modulada por ancho de pulso.

Los componentes pasivos externos de cada aplicación, como inductancias y capacitores, deben ser dimensionados e incorporados por el operador del convertidor de forma externa. El CEMP incluye todas las mediciones necesarias para la ejecución de un control a lazo cerrado sin importar la aplicación que fuese, pudiendo incluso realizarse la medición de una variable eléctrica externa al hardware del convertidor.

El enfoque del presente artículo en lo que respecta a la presentación de las aplicaciones del convertidor consiste en tres pasos:

- La presentación de la topología básica de conversión.
- La utilización de la etapa de potencia del CEMP según sea la topología seleccionada.
- La inclusión de componentes pasivos adicionales.

A. Boost

La configuración boost básica se presenta en la Fig. 8. Bajo condiciones de corriente ininterrumpida por la inductancia L, la tensión de salida, v_o , en función de la tensión de entrada, v_i , resulta [2]:

$$v_o = \frac{1}{1-\delta} \cdot v_i \quad (1)$$

donde δ es el ciclo de trabajo aplicado al transistor Q. Siendo que δ posee un rango de valores permitidos entre 0 y 1, esta topología permite obtener una tensión de salida cuya amplitud es superior a la tensión de entrada.

Este tipo de aplicación se caracteriza por el hecho de que la corriente provista por la fuente v_i es igual a aquella circulante por la inductancia.

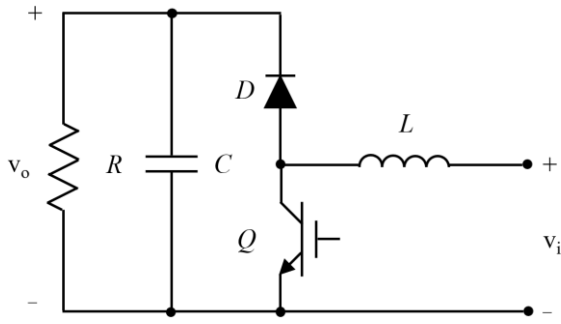


Fig. 8. Diagrama circuital simplificado de un convertidor boost.

La utilización de la etapa de potencia del CEMP para la aplicación del convertidor boost se presenta en la Fig. 9. Esta aplicación requiere de la utilización de un transistor inferior y el diodo *free-wheel* superior. Es importante aclarar que la operación de los tres transistores inferiores y los tres diodos *free-wheel* superiores en paralelo es posible, permitiendo así incrementar el nivel de potencia procesable por la aplicación.

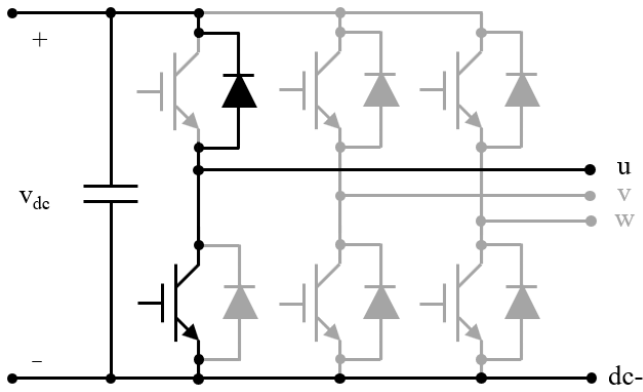


Fig. 9. Utilización de la etapa de potencia del CEMP como boost.

La utilización de componentes pasivos externos al convertidor para la implementación de esta aplicación se muestra en la Fig. 10. Se observa que ésta requiere únicamente de un inductor externo en virtud de que el capacitor del bus de cc funciona como capacitor de filtro para la carga R .

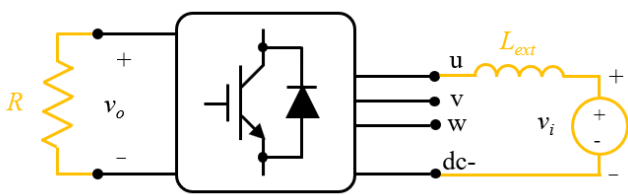


Fig. 10. Diagrama esquemático simplificado de configuración boost con CEMP.

B. Buck

La configuración buck básica se presenta en la Fig. 11. Bajo condiciones de corriente ininterrumpida por la inductancia L , la tensión de salida, v_o , en función de la tensión de entrada, v_i , resulta [2]:

$$v_o = \delta \cdot v_i \tag{2}$$

Siendo que δ posee un rango de valores permitidos entre 0 y 1, esta topología permite obtener una tensión de salida cuya amplitud es inferior a la tensión de entrada.

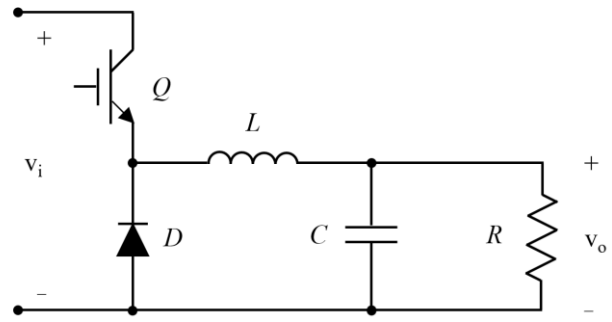


Fig. 11. Diagrama circuital simplificado de un convertidor buck.

La utilización de la etapa de potencia del CEMP para la aplicación de este tipo de convertidor se presenta en la Fig. 12. A diferencia de la topología boost, esta aplicación requiere de la utilización de un transistor superior y el diodo *free-wheel* inferior. La operación en paralelo de los dispositivos semiconductores es también aplicable a esta topología.

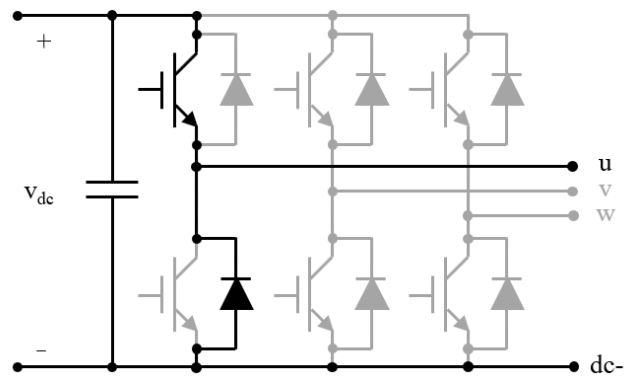


Fig. 12. Utilización de la etapa de potencia del CEMP como buck.

La utilización de componentes pasivos externos al convertidor para la implementación de esta aplicación se muestra en la Fig. 13. Esta topología requiere de la conexión externa de un inductor y un capacitor.

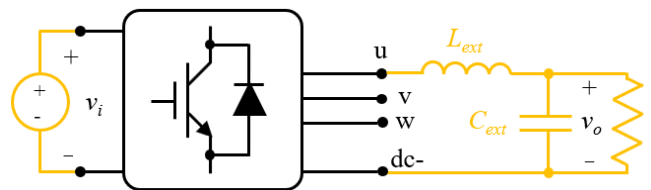


Fig. 13. Diagrama esquemático simplificado de configuración buck con CEMP.

C. Aplicaciones buck y boost polifásicas

De acuerdo a lo descrito anteriormente, los convertidores buck y boost presentados anteriormente tienen la posibilidad de operar con sus dispositivos semiconductores en paralelo a los efectos de aumentar la potencia procesable por el convertidor.

Una mejora sobre las anteriores configuraciones es la implementación de convertidores cc-cc polifásicos. La

literatura técnica en inglés denomina a este tipo de configuraciones como *interleaved*.

Un ejemplo de aplicación cc-cc trifásico se presenta en la Fig. 14. En ellas, las fuentes v_1 y v_2 pueden representar a una fuente o un sumidero de potencia. Cualquiera de estas fuentes puede ser reemplazada por una resistencia de carga, tal como se presentase en la Fig. 10 – para un boost – o en la Fig. 13 – para un buck –. La Fig. 14 sirve para entender que el comportamiento bidireccional – en lo que respecta al flujo de potencia – aplica también para topologías cc-cc implementadas con el CEMP.

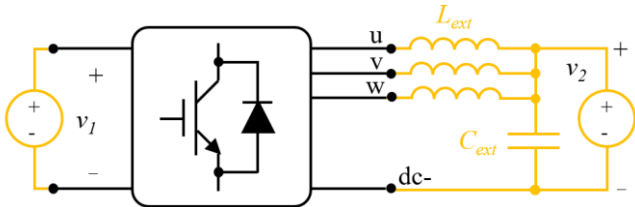


Fig. 14. Aplicación de fuente cc-cc polifásica.

La técnica de modulación polifásica para convertidores cc-cc permite reducir el tamaño de los filtros del equipo al incrementar la frecuencia de conmutación efectiva [10] vista por el capacitor C_{ext} .

D. Inversor PWM

El CEMP puede operar como inversor PWM monofásico o trifásico.

La operación como inversor monofásico contempla la operación de dos piernas cualesquiera del convertidor, como muestra la Fig. 15. Las técnicas de modulación quedan a decisión del operador, siendo la modulación bipolar y unipolar las utilizadas en la mayoría de las aplicaciones [5]. Modulaciones híbridas, como la presentada en [11], también pueden ser ejecutadas por el CEMP.

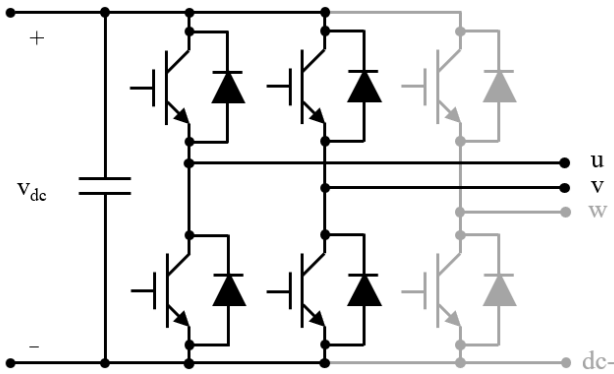


Fig. 15. Utilización de la etapa de potencia del CEMP como inversor PWM.

La interconexión del CEMP con los componentes pasivos externos para la ejecución de un inversor PWM monofásico se muestra en la Fig. 16. Dependiendo de las características de la carga, puede ser necesaria la inclusión de un filtro LC, compuesto por L_{ext} y C_{ext} , que permita reducir la distorsión armónica de la tensión aplicada a la carga.

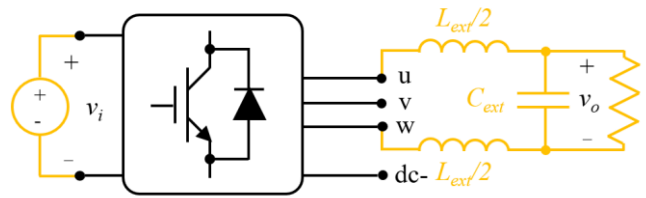


Fig. 16. Implementación de inversor monofásico con CEMP.

La operación como inversor trifásico requiere de la utilización de todos los dispositivos semiconductores del puente. Este tipo de aplicación es muy común en los variadores de velocidad de motores eléctricos. El ejemplo de utilización del CEMP para dicha aplicación se presenta en la Fig. 17.

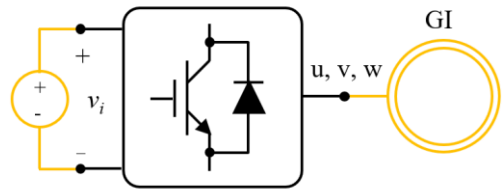


Fig. 17. Implementación de variador de velocidad con CEMP.

E. Rectificador PWM

El CEMP puede operar como rectificador PWM monofásico o trifásico. En ambos casos, el rectificador utiliza los mismos dispositivos semiconductores que los presentados para el inversor PWM.

La implementación de este tipo de topología de conversión con el CEMP se observa en la Fig. 18 (para el caso monofásico) y en la Fig. 19 (para el caso trifásico)

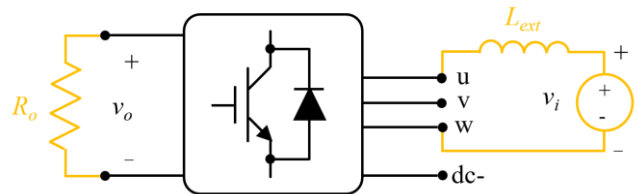


Fig. 18. Implementación de rectificador monofásico con CEMP.

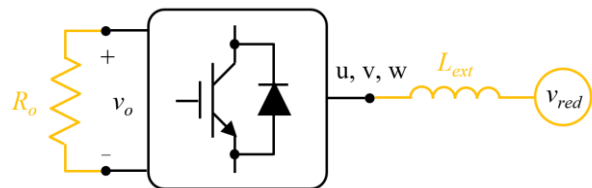


Fig. 19. Implementación de rectificador trifásico con CEMP.

F. Convertidor back-to-back

La conversión ca-ca puede ser realizada por el CEMP por medio de una configuración *back-to-back*. Este tipo de topología requiere de dos CEMP, cuyos buses de cc se encuentran conectados en forma directa. La Fig. 20 presenta en forma gráfica dicha aplicación. En ella se observa que uno de los convertidores opera como rectificador, mientras que el otro lo hará como inversor.

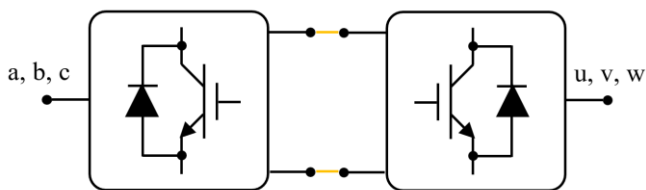


Fig. 20. Aplicación de convertidor back-to-back con dos CEMP

La configuración *back-to-back* permite la conversión ca-ca en las que los puertos *a, b, c* pueden operar a una frecuencia eléctrica diferente de la de los puertos *u, v y w*. A su vez, el flujo de potencia activa entre estos puertos puede ser revertido.

Las configuraciones *back-to-back* son ampliamente utilizadas en variadores de velocidad de motores con frenado regenerativo y en la industria de la energía eólica para aerogeneradores de gran potencia.

IV. RESULTADOS

Actualmente la Universidad cuenta con un total de dieciséis CEMP, siendo cuatro de ellos la versión *full-power* y los restantes doce la versión *lite*.

Los convertidores *full-power* se desempeñan como unidad de conversión en los elementos de generación y almacenamiento de energía en la microrred eléctrica híbrida implementada en el Laboratorio de Automatización y Control de la Universidad, denominada REILAC.

Bajo este proyecto de investigación, los convertidores sirven como plataforma de hardware para la ejecución de distintos proyectos finales de ingeniería por parte de alumnos de la carrera de Ingeniería Electrónica. Entre ellos se destacan:

- Almacenamiento de energía en volante de inercia, por medio de una configuración cc-ca bidireccional.
- Intercambio de potencia con la red eléctrica por medio de una aplicación cc-ca bidireccional (proyecto en etapa de finalización).
- Almacenamiento de energía con supercapacitores por medio de una aplicación cc-cc bidireccional (proyecto en etapa de desarrollo).
- Rectificador PWM para inyección de potencia en una subred de cc desde un generador asincrónico accionado por una turbina eólica emulada físicamente.

Los resultados de la implementación de esta microrred en el desarrollo de los estudiantes de grado que realizan su Proyecto Final de Ingeniería en el Laboratorio de Automatización y Control son presentados en [12].

Los convertidores *lite* son usados por la Cátedra de Electrónica de Potencia de la Universidad en dos asignaturas de grado.

La primera de ellas es un curso introductorio a la Electrónica de Potencia, en la que se presentan las topologías clásicas de conversión cc-ca, cc-cc y ca - cc. En ella, los CEMP son utilizados para la presentación práctica de estas topologías. El objetivo de la utilización de los CEMP es mostrar en vivo las formas de onda de interés por medio de un

osciloscopio digital, apuntando así a la minimización de los tiempos de presentación de temas en pizarra y a la extensión del tiempo en que los alumnos operan con equipos reales e instrumental de laboratorio.

La segunda asignatura está relacionada con el estudio dinámico de las topologías presentadas en el primer curso y el desarrollo de los sistemas de control necesarios. Este curso se ve claramente beneficiado por la utilización del CEMP en vista de que permite el estudio y síntesis de controladores digitales por parte de los alumnos sin la necesidad de diseñar y/o armar placas de circuito impreso externas.

V. CONCLUSIONES

Se presenta una plataforma de hardware para la enseñanza de distintas topologías de conversión de energía por medio de dispositivos semiconductores de corte y conducción controlada.

El desarrollo del convertidor, en lugar de la compra directa de una solución comercial, permite la formación de RR.HH. de la Universidad Nacional de Rosario en la temática. A su vez, los equipos desarrollados resultan más económicos. Este punto resulta crítico para las universidades argentinas, en donde el presupuesto asignado para los laboratorios puede ser limitado para la adquisición de equipos comerciales.

La fabricación de los equipos también garantiza la disponibilidad de la documentación necesaria para su reparación en caso de falla, lo cual tiene una alta probabilidad cuando los convertidores son empleados en escenarios de enseñanza y prototipado.

La operación de este convertidor permitirá a los alumnos comprender aspectos prácticos de la Electrónica de Potencia de una forma completa, interrelacionando los contenidos de distintos cursos abordados en la formación de grado, tales como control, teoría de sistemas y señales, electrónica analógica y digital.

La plataforma desarrollada provee una solución integral para la ejecución de actividades de laboratorio, así como su utilización para proyectos finales y/o actividades de investigación siendo que:

- Cuenta con un sistema de control digital, implementado con un DSP, lo que permite la síntesis de controles particulares para cada aplicación.
- No requiere del diseño y construcción de placas de circuito impreso adicionales, contando así con todos los circuitos necesarios para su operación en cualquiera de las topologías presentadas.
- Los elementos pasivos externos, tales como inductores y capacitores, son fácilmente conectables al convertidor.

En lo que respecta a la opinión de los alumnos, se releva un importante porcentaje de aceptación en la utilización de esta plataforma de hardware, siendo los puntos más resaltados:

- Aplicación práctica de contenidos vistos en otras asignaturas de la carrera.
- Reducción del espacio de clases teóricas, siendo reemplazadas por clases prácticas.

- Incremento en la frecuencia de utilización del instrumental de laboratorio.
- Implementación real de convertidores conmutados.

Es importante aclarar que no existen métricas aún para la evaluación a mediano y largo plazo de la incidencia del convertidor multi-propósito en la enseñanza de la electrónica de potencia en virtud de que su utilización se inició en el segundo semestre del año 2019.

Otro punto importante detectado es el creciente interés por parte de los estudiantes en el desarrollo de aplicaciones de Electrónica de Potencia que incluyan al CEMP como parte de su proyecto final de ingeniería. Esto involucra tanto al Laboratorio de Automatización y Control como a la Cátedra de Electrónica de Potencia.

Así, la inclusión del convertidor al instrumental de la Universidad ha permitido incrementar el número de proyectos finales asociados a la Electrónica de Potencia. Éstos han sido históricamente escasos si son comparados con el número de proyectos asociados a otras ramas de la electrónica. Distintas causas han motivado esto, entre las que destacamos:

- Los proyectos asociados a la electrónica de potencia son generalmente más largos.
- El costo de los equipos, de no ser un proyecto promovido por un laboratorio o cátedra, debe ser afrontado por los alumnos. Los costos de un proyecto asociado a la electrónica de potencia pueden ser ampliamente superiores a los de otras ramas.
- Hace años se detecta que un importante porcentaje de los estudiantes de último año se encuentran insertados laboralmente, lo que incide en contra de la elección de proyectos finales que puedan resultar extensos y con una alta dedicación semanal.

REFERENCIAS

- [1] E. C. dos Santos Jr. y E. R. Cabral da Silva, "Advanced power electronics converters: PWM converters processing AC voltages". Ed. John Wiley & Sons Ltd. Hoboken, 2015, ISBN 9781118880944.
- [2] N. Mohan, T. Underland, y W. Robbins, "Power electronics: converters, applications and desing". Ed. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 2003, ISBN 0471226939.
- [3] P. Amoedo, E. Schmittendorf. "Convertidor multipropósito con aplicación en redes híbridas inteligentes de generación eléctrica a partir de fuentes renovables". Proyecto Final de Ingeniería Electrónica. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, *Universidad Nacional de Rosario*. Rosario, 2016.
- [4] P. Amoedo, E. Schmittendorf, D. Alba, A. Vazquez Sieber. "Convertidor multipropósito con aplicación en redes híbridas inteligentes de generación eléctrica a partir de fuentes renovables". En *X Jornada de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Rosario*. Rosario, 2016.
- [5] R. Teodorescu, M. Liserre y P. Rodríguez. "Grid converters for photovoltaic and wind power systems". Ed. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 2011, ISBN 9780470057513.
- [6] Texas Instruments. "TMS320x2833x Analog to Digital Converter (ADC) Module, Reference Guide". Dallas, 2007. Disponible en internet: http://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/171/2260.TI_5F00_TMS320x2833x-Analog_2D00_to_2D00_Digital-Converter.pdf
- [7] Power converter. teknoCEA. Barcelona. Disponible en internet: <https://www.teknocea.cat/components/power-converter>
- [8] Power modules. imperix. Disponible en internet: <https://imperix.ch/products/power>
- [9] PCB-based Inverter Platforms. Creative Power Technologies. Disponible en internet: <http://www.creativepower.com.au/products/pcbbasedIP.html>
- [10] Thiyagarajan, A., Praveen Kumar, S. G., & Nandini, A. "Analysis and comparison of conventional and interleaved DC/DC boost converter". En *Second International Conference on Current Trends In Engineering and Technology*, pp. 198-205. Coimbatore, 2014.
- [11] Texas Instruments. "Design guide: TIDM-HV-1PH-DCAC. Voltage source inverter reference design". Dallas, 2019. Disponible en internet: <http://www.ti.com/lit/ug/tiduay6d/tiduay6d.pdf>
- [12] J. Ezpeleta, S. Junco, D. Alba. "Development of an experimental electric micro smart grid with renewable sources and energy storages through final electronics engineering projects". En *Fourteenth International Conference In Technology, Teaching and Learning of Electronics*. Porto, 2020.