

# *Plataforma Experimental para el Desarrollo y Evaluación de Sistemas de Generación Híbridos Basados en Pilas de Combustible*

Talpone J.I.<sup>(1)</sup>, Puleston P.F.<sup>(2)</sup>, More J. J.<sup>(3)</sup>, Griñó R.<sup>(4)</sup>, Cendoya M. G.<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> U.N.L.P, Facultad de Ingeniería, LEICI, Calle 1 y 47, 1900, La Plata, Argentina, [juan.talpone@ing.unlp.edu.ar](mailto:juan.talpone@ing.unlp.edu.ar).

<sup>(2)</sup> U.N.L.P, Facultad de Ingeniería, LEICI, Calle 1 y 47, 1900, La Plata, Argentina.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), [puleston@ing.unlp.edu.ar](mailto:puleston@ing.unlp.edu.ar).

<sup>(3)</sup> U.N.L.P, Facultad de Ingeniería, LEICI, Calle 1 y 47, 1900, La Plata, Argentina.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), [jmore@ing.unlp.edu.ar](mailto:jmore@ing.unlp.edu.ar).

<sup>(4)</sup> U.P.C, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, IOC, Av. Diagonal 647, 08028, Barcelona, España, [roberto.grino@upc.edu](mailto:roberto.grino@upc.edu).

<sup>(5)</sup> U.N.L.P, Facultad de Ingeniería, LEICI, Calle 1 y 47, 1900, La Plata, Argentina.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), [cendoya@ing.unlp.edu.ar](mailto:cendoya@ing.unlp.edu.ar)

**Resumen** - En marco de un proyecto de colaboración internacional, se ha desarrollado una plataforma experimental de generación híbrida de energía eléctrica que permite implementar en tiempo real algoritmos de control avanzado, orientados a maximizar la eficiencia energética y optimizar la gestión de potencia eléctrica. La plataforma está formada por dos canales de generación: uno basado en una Pila de Combustible (FC) y otro, constituido por una fuente electrónica programable que emula un sistema de generación eólica. Se dispone además de un canal de almacenamiento, que utiliza Supercapacitores (SC). Por último, una carga electrónica representa la demanda de energía cuyo perfil puede ser especificado de manera arbitraria. Todos los canales del sistema están conectados a un Bus de CC común; la FC y el SC lo hacen a través de convertidores electrónicos intermediarios. Éstos son controlados por un sistema basado en un procesador digital de señales. Todo el equipo es supervisado mediante una PC. La plataforma presenta una gran versatilidad. Resultados experimentales permiten validar su funcionamiento en forma integral.

**Palabras Claves:** Sistema Híbrido, Energías Alternativas, Pila de Combustible, Supercapacitor

**Abstract** - As part of an international collaborative project, an experimental platform for hybrid power generation has been developed. This allows to implement real-time advanced control algorithms, designed to maximize energy efficiency and optimize the electrical power management. The platform consists of two generation channels: one based on a fuel cell (FC) and another, implemented with a programmable electronic source that emulates a wind generation system. It also has a storage channel using Supercapacitors (SC). Finally, an electronic load represents an energy demand profile that can be specified arbitrarily. All channels of the system are connected to a common DC bus. The FC and SC do so through intermediary electronic converters, which are controlled by a digital signal processor. The complete system is monitored through a PC. The platform is highly versatile. Experimental results are shown to validate the whole system performance.

**Keywords:** Hybrid System, Alternative Energy, Fuel Cell, Supercapacitor

## INTRODUCCIÓN

El diseño y perfeccionamiento de sistemas de generación eléctrica eficientes, basados en energías alternativas, se ha convertido en un área de investigación y desarrollo de importancia en la actualidad. La creciente

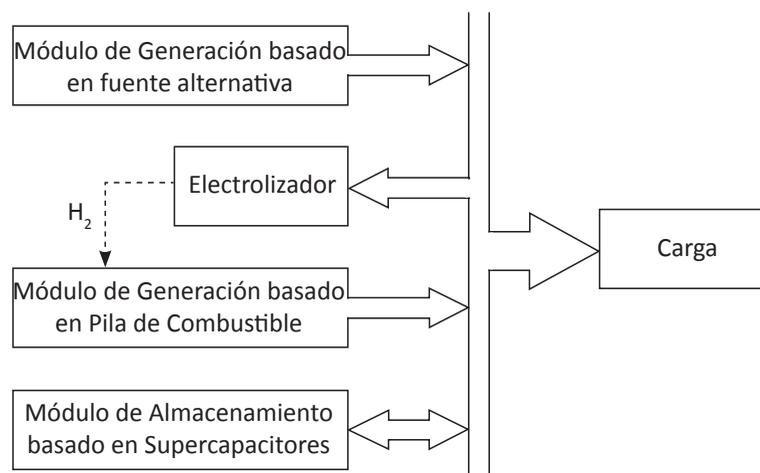
demanda de energía, la constante disminución de las fuentes de energía de origen fósil y la preocupación por el deterioro del medio ambiente han volcado la atención a las tecnologías basadas en fuentes de energía alternativas, en particular, aquellas cuya disponibilidad es continua, y su impacto ambiental es mínimo (Farooque & Maru, 2001).

En este contexto, las investigaciones en el campo de nuevas tecnologías para sistemas híbridos se han vuelto un tema de alta prioridad. En particular hoy en día, los sistemas basados en Pilas de Combustible surgen como una alternativa prometedora a los sistemas basados en combustibles fósiles en aplicaciones en vehículos eléctricos y residenciales.

Es entonces que, por las razones expuestas, es necesario contar con Sistemas Híbridos de generación de laboratorio, altamente versátiles, que permitan el análisis, desarrollo y evaluación experimental de nuevas topologías tendientes a la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Estos sistemas deben contribuir al diseño y perfeccionamiento de nuevos controladores, logrando así maximizar la eficiencia energética de conversión y optimizar la gestión de potencia eléctrica (Ellis et al., 2001).

En este trabajo, desarrollado en el marco de un proyecto de colaboración internacional con el Grupo ACES en el Laboratorio de Pilas de Combustible del Instituto de Robótica e Informática Industrial (Universidad Politécnica de Cataluña - CSIC), se presenta el diseño e implementación de una plataforma experimental de generación híbrida de energía eléctrica. La misma permite evaluar, en tiempo real, nuevos algoritmos de control avanzado, orientados a maximizar la eficiencia energética y optimizar la gestión de potencia eléctrica.

Como se observa en la Fig. 1, el sistema híbrido implementado está constituido por un módulo de generación basado en una Pila de Combustible (FC), un módulo de almacenamiento constituido por Supercapacitores (SC), y un canal de generación basado en una fuente de energía alternativa adicional, en particular en nuestro caso, emulando una turbina eólica.



*Fig. 1 - Diagrama en bloques general del sistema híbrido propuesto*

De todas las topologías posibles para Sistemas Híbridos, se optó por utilizar aquella en la cual todos los módulos se vinculan mediante un bus común de CC, dado que a diferencia de uno con bus común de CA, no requiere ningún tipo de sincronismo, ni control de energía reactiva (Suh, Stefanopoulou, 2005).

## DESARROLLO DEL TRABAJO

### Módulo de generación basado en Pila de Combustible

En la Fig. 2 se muestra un diagrama en bloques de éste módulo:

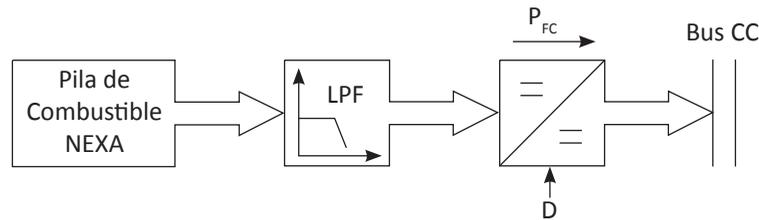


Fig. 2 - Diagrama en bloques del canal de generación basado en la Pila de Combustible

La Pila de Combustible es un stack tipo PEM, modelo NEXA® MAN5100078, fabricada por la compañía Ballard®. Su potencia nominal es de 1.2kW. Cuando ésta entrega una potencia cercana este valor, proporciona una tensión de salida de unos 30V.

Las pilas tipo PEM presentan grandes variaciones en su tensión de salida, de acuerdo a la potencia demandada (Barbir, 2005). Como puede verse en la Fig. 3, la tensión de salida de la FC presenta grandes variaciones, pasando de alrededor de 27V a plena carga a 43V en vacío. El rango de tensión de salida de operación normal varía aproximadamente desde 27 hasta 36V (Nexa™).

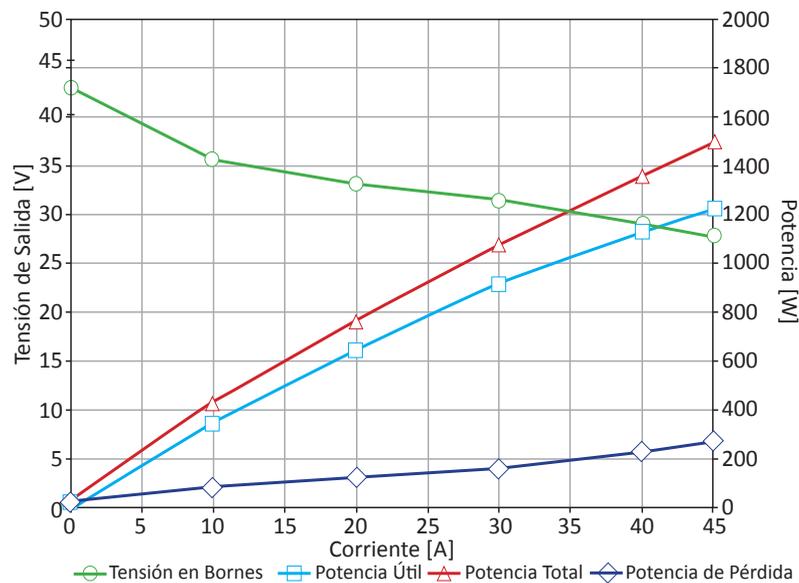


Fig. 3 - Características de salida del stack PEM Nexa® MAN5100078

La conexión al bus de CC del stack se realiza través de un convertidor del tipo elevador (step-up) unidireccional en corriente, de manera que sólo es posible extraer potencia de la FC. La topología utilizada para el convertidor se puede observar en la Fig. 4.

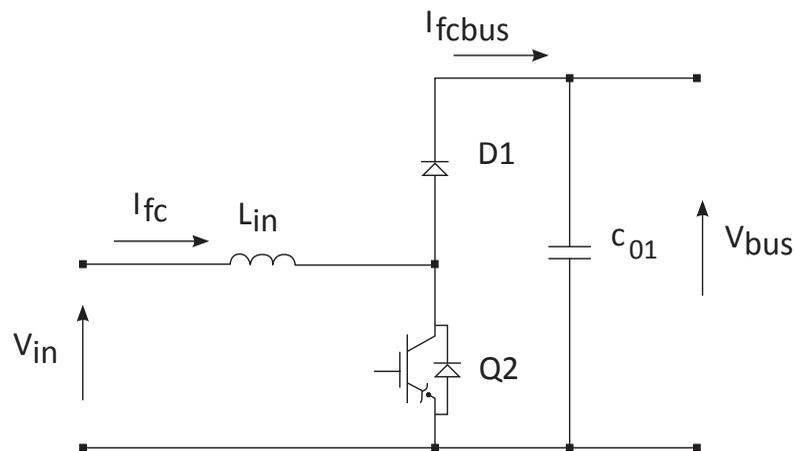


Fig. 4 - Convertidor CC/CC tipo elevador (step-up) unidireccional

**Diseño del convertidor**

A partir de la característica de la FC presentada en la Fig. 3, quedan determinados los requisitos del convertidor:

Tensión de entrada: 27 a 36V.

Corriente de entrada: 10 a 45A.

Tensión de salida: 75V.

Potencia máxima: 1.2 kW.

El desarrollo del convertidor está basado en un módulo de tres columnas de Semikron® (Semikron®, 2006); cada una posee dos llaves IGBT (1200V – 75A). Para la implementación de este convertidor se utilizó una columna completa. El módulo incluye los drivers de excitación para las llaves y un sensor de efecto hall por columna, que en este caso permite medir Ifc. El control de las llaves se realiza a través de señales lógicas independientes. Además, los drivers del módulo incluyen la lógica de protección que evita la activación simultánea de las llaves de una misma columna.

La relación de conversión de este tipo de convertidor es:

$$V_{bus} = \frac{V_{in}}{(1 - D)} \tag{1}$$

donde *D* es el ciclo de trabajo, *V<sub>in</sub>* la tensión de entrada y *V<sub>bus</sub>* la tensión de salida.

Conociendo la zona de operación de la FC y teniendo en cuenta (1), queda determinado el rango de variación del ciclo de trabajo,  $0,52 < D < 0,64$ .

El valor de la inductancia *L<sub>in</sub>* necesario se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$L_{in(min)} = \frac{D \cdot (1 - D)^2 V_{bus}}{2 \cdot f_s \cdot I_{fc bus}} \tag{2}$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de conmutación y  $I_{f_{cbus}}$  la corriente de salida.

Teniendo en cuenta la frecuencia de conmutación elegida y los datos anteriores el valor de inductancia mínimo resultó ser 22  $\mu$ Hy. Se optó entonces por utilizar una inductancia de 35  $\mu$ Hy, construida a partir del núcleo de mayor tamaño que fue posible disponer, dados los materiales disponibles, dimensiones y costo (McLyman, 1988). Para este valor de inductancia, el ripple obtenido máximo es de unos  $\Delta I_{fc} = 22A$ . Si bien el convertidor operará en modo de conducción continua en todo el rango de trabajo, el ripple en la corriente de entrada no es aceptable, dada su amplitud, para el buen funcionamiento de la FC. Fue necesario, entonces, añadir un filtro pasabajos entre la FC y el convertidor (Jong-Hoon Kim, 2011). En la Fig. 5 se muestra un esquema del filtro, y su conexión con la FC y el step-up. Es un filtro L-C de segundo orden cuyos componentes fueron dimensionados a partir de:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_f \cdot C_f}} \tag{3}$$

$$\zeta = \frac{1}{2 \cdot R} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \tag{4}$$

donde  $f_c$  es la frecuencia de corte,  $R$  la resistencia equiv. de carga del filtro,  $L_f$  la inductancia,  $C_f$  la capacidad y  $\zeta$  el amortiguamiento.

Pretendiendo una atenuación a  $f_s$  de unos 60 dB, resulta  $f_c \approx 500Hz$ .

A partir de (3), (4) y considerando:  $R = 36V/10A = 3,6\Omega$ , se obtuvo:  $L_f = 40\mu Hy - 60^a$  y  $C_f = 2200\mu F - 100V$ .

Este valor de  $C_f$  requiere que el mismo sea electrolítico y por lo tanto se añadió en paralelo  $C_p = 1 \mu F$ , de poliéster metalizado, para mejorar el desempeño del filtro en alta frecuencia.

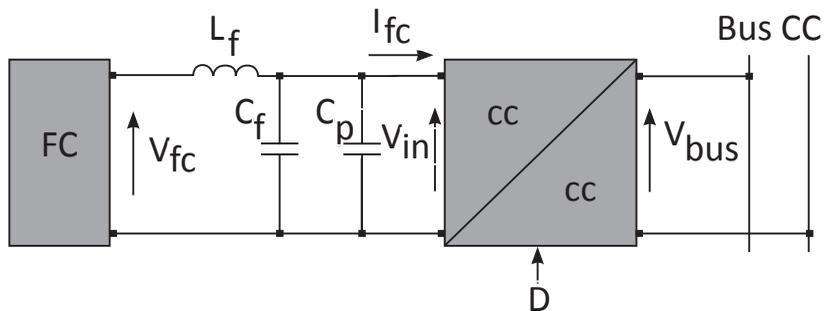


Fig. 5 - Detalle conexión del filtro de la FC

Considerando un rizado en la tensión  $V_{bus}$  del 1 %, el valor mínimo necesario para  $C_{01}$  resulta en 700 $\mu$ F (Mohan et al., 2001).

### Módulo de almacenamiento basado en Supercapacitor

En la Fig. 6 se muestra un diagrama en bloques del canal de almacenamiento:

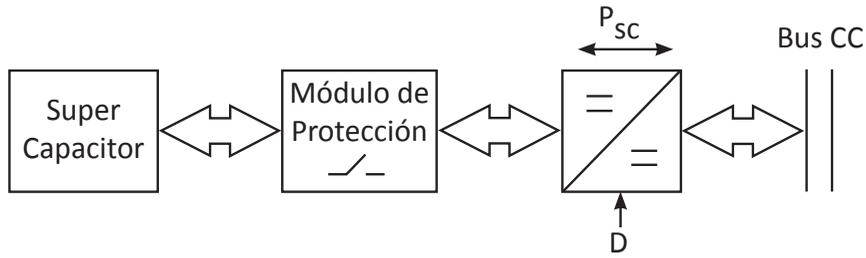


Fig. 6 - Diagrama en bloques del canal de almacenamiento con SC

Este canal posee una estructura similar a la de generación considerada en el inciso 2.1. Por consideraciones de balance energético del sistema completo, se decidió utilizar un Supercapacitor de la compañía Maxwell® (Maxwell Technologies, Inc.) cuyas características básicas son las siguientes:

- Capacidad: 165F.
- Tensión Nominal: 48,6V.
- Tensión Máx. Admisible: 50,4V.
- ESR: 6,3mΩ.
- Corriente continua máx.: 98A.

La energía que se puede extraer de un banco de Supercapacitores está dada por:

$$\Delta E_{SC} = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot (V_i^2 - V_f^2) \tag{5}$$

donde  $C_{SC}$  es la capacidad del SC,  $V_i$  la tensión inicial y  $V_f$  la tensión final.

Considerando un valor de  $\Delta E_{SC}$  del 75% del valor nominal, de (5) resulta que la  $V_f = V_i/2$ .

Por razones de seguridad se optó por trabajar con  $V_i = 45V$ . De esta forma resulta  $V_f = 22,5V$  (Maxwell Technologies, Inc.).

El Supercapacitor se conecta al bus a través de un convertidor CC-CC bidireccional como el mostrado en la Fig. 7.

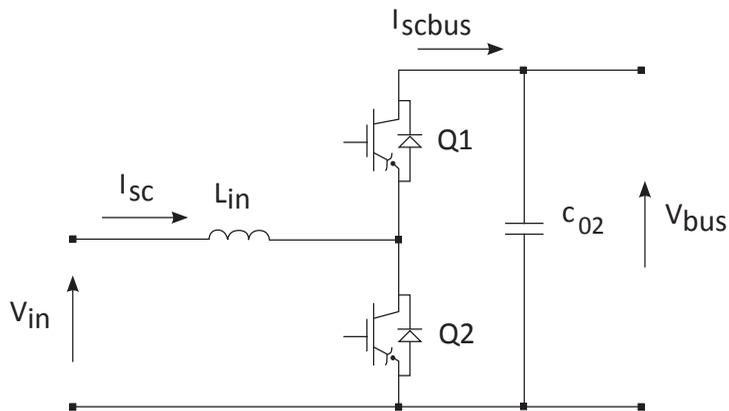


Fig. 7 - Convertidor CC/CC bidireccional

**Diseño del convertidor**

Este convertidor está implementado con otra columna del módulo Semikron® anteriormente citado. Teniendo en cuenta las limitaciones del mismo (Semikron®, 2007) y las características del SC, quedan determinados los requisitos del convertidor:

Tensión de entrada: 22,5 a 45V.

Corriente de entrada: 0 a 60A.

Tensión de salida: 75V.

Las llaves  $Q1$  y  $Q2$  funcionan de manera complementaria. Dado que aquí la corriente fluye en ambos sentidos, el convertidor siempre opera en modo de conducción continua.

Por disponibilidad, en este caso, se utilizó el mismo valor de inductancia  $L_{in}$  que en el convertidor unidireccional de la FC.

El ciclo de trabajo del convertidor estará comprendido, (1), entre  $0,4 < D < 0,7$ . De esta forma, el ripple de corriente resultante es  $\Delta I_{sc} = 22,5A$  (Mohan et al., 2001).

Además, el valor mínimo de capacidad necesario para obtener un rizado en la tensión  $V_{bus}$  del 1 %, resulta en  $800\mu F$  (Mohan et al., 2001).

De esta forma, dado que ambos convertidores comparten el mismo bus, se decidió integrar  $C_{01}$  y  $C_{02}$  en un único banco de capacitores formado por EPCOS B43303A0687, con una capacidad equivalente  $C_{bus} = 2720 \mu F$ .

**Módulo de Protección del SC / Convertidor**

Dadas las limitaciones del SC y el convertidor asociado, es necesario contar con un módulo que permita desconectar el SC, en caso de que su tensión alcance el valor máximo o la corriente a través de las llaves del convertidor sea excesiva.

Como puede observarse en el esquema general del módulo de protección, en la Fig. 8, el mismo consta de una lógica de control que se encarga de medir la tensión del SC y la corriente en la entrada del convertidor.

Cuando el sistema opera en forma normal la llave  $S_p$  permanece abierta y  $S_s$  cerrada. En caso que la tensión en bornes del SC supere los 48V, o bien la corriente alcance los  $\pm 60A$ , la lógica cierra  $S_p$  y abre  $S_s$ , conectando una resistencia  $R_d$  de descarga en paralelo al SC y desconectando a éste último del convertidor. De esta forma, el SC comienza a descargarse.

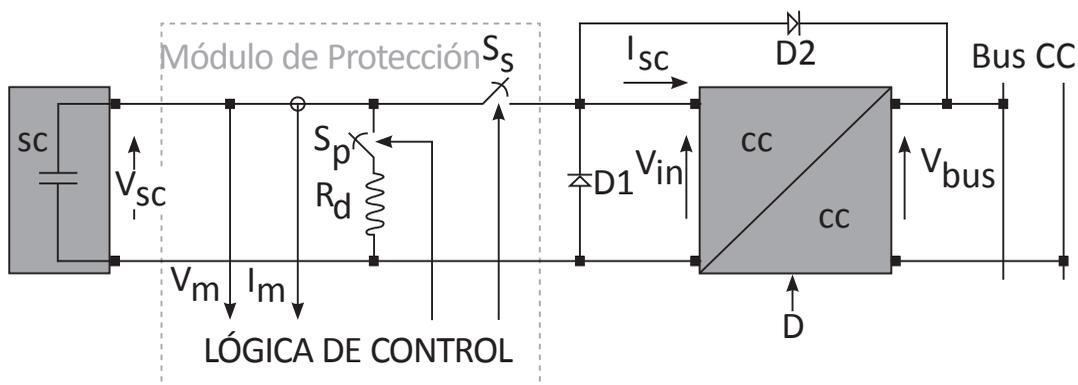


Fig. 8 - Módulo de protección SC/convertidor

Para evitar sobretensiones, ocasionadas por el inductor de entrada del convertidor, durante la apertura de  $S_3$ , se colocó un enclavamiento formado por  $D1$  y  $D2$ .

La lógica de control fue implementada utilizando lógica discreta y no basada en un microprocesador, debido a que éste último tipo de dispositivos no asegura que el programa, que monitorea las variables de interés y se ejecuta en su interior, se detenga y como consecuencia la protección no funcione y el operador no sepa de ello.

Cuando la protección se dispara, debe ser reiniciada manualmente por el operador del sistema, aumentando así la seguridad de operación.

### **Módulo de generación basado fuente alternativa (canal eólico)**

Para este canal de generación se utilizó una Fuente Electrónica Programable (PES) de la compañía alemana H&H de 3kW de potencia. La misma permite emular fuentes de energía alternativas. En particular, es de nuestro interés, su uso para representar un generador eólico.

Es posible, mediante una PC, modificar el perfil de potencia, de manera de representar el funcionamiento de una turbina eólica para diferentes condiciones de viento. Ésta se halla conectada al bus de CC en forma directa.

### **Electrolizador y Carga**

En la estructura realizada se optó por representar el conjunto Electrolizador – Carga en el sistema en un único módulo, a partir de una Carga Electrónica Programable (PEL) de la compañía alemana H&H de 4,2kW de potencia. No obstante, el sistema admite, con mínimas modificaciones, la incorporación de un electrolizador real cuando los experimentos lo requieran.

La PEL puede fácilmente ser programada a través de una PC lo cual provee gran flexibilidad para cambiar las condiciones de carga del sistema.

### **Módulo de Procesamiento y Control**

El sistema es controlado y supervisado por dos unidades independientes:

DSP: Se utiliza un kit de desarrollo de Spectrum Digital® basado en un DSP Texas Instruments® FZ28335 para controlar los convertidores asociados a la FC y al SC.

Se desarrolló una placa de acondicionamiento de señal y filtrado para medir:

$V_{fc} - I_{fc}$ : tensión y corriente de la FC.

$V_{sc} - I_{sc}$ : tensión y corriente del SC.

$V_{bus} - I_{bus}$ : tensión y corriente en el Bus.

De esta forma, el DSP adquiere las señales anteriores y ejecuta en tiempo real los algoritmos de control de usuario, determinando el estado de las llaves de cada convertidor en forma independiente.

PC: El control supervisor del sistema completo lo realiza una PC. La misma se comunica con el DSP a través de una interfaz USB. De esta forma pueden intercambiar parámetros de control y medición del sistema. Además, se encarga de generar los perfiles de inyección de potencia y de carga del canal de generación adicional y el conjunto Electrolizador – Carga.

Mediante la PC es posible visualizar y almacenar las tensiones y corrientes medidas del sistema y conocer las condiciones de funcionamiento de la plataforma.

## **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Se presentan a continuación los resultados experimentales de un ejemplo a aplicación para la plataforma desarrollada en este trabajo.

Como objetivo de control se busca fijar la tensión del bus en 60V. La Pila de Combustible se encarga de

suministrar la componente de baja frecuencia de la potencia demandada por la carga. Los SC se encargan de entregar la potencia en los transitorios, ante un cambio en la potencia demandada por la carga, durante el intervalo de tiempo en que la FC alcanza el nuevo valor solicitado (Moré et al., 2010).

Con este fin el convertidor del SC se controla mediante dos lazos: uno interior de corriente y otro exterior de tensión para regular los 60V de tensión en el bus. El convertidor de la FC se controla mediante un lazo de corriente cuya referencia se calcula a partir del valor de potencia demandada por la carga. En el cálculo de esta referencia también se considera el error de tensión del SC de manera que lentamente éstos se recarguen a un valor fijo de 42V.

En la Fig. 9 se muestran las curvas obtenidas del ensayo realizado. Se representan  $V_{bus}$  e  $I_{bus}$ ,  $V_{sc}$  e  $I_{sc}$  y  $V_{fc}$  e  $I_{fc}$ . La corriente  $I_{bus}$ , corresponde a la de la potencia neta resultante de los módulos: carga, electrolizador y fuente alternativa. ( $I_{neta} = I_{carga} + I_{electrolizador} - I_{fuente\_alternativa}$ ).

Inicialmente, se cierra el lazo de corriente en la FC y se fija la referencia en 4A para cargar el SC hasta que su tensión es de unos 15V en  $t_1$ , dónde se cierra el lazo de control de tensión en el bus, fijando la tensión del mismo en 60V. Además se incrementa el valor de referencia de corriente de la FC y se continúa cargando el SC.

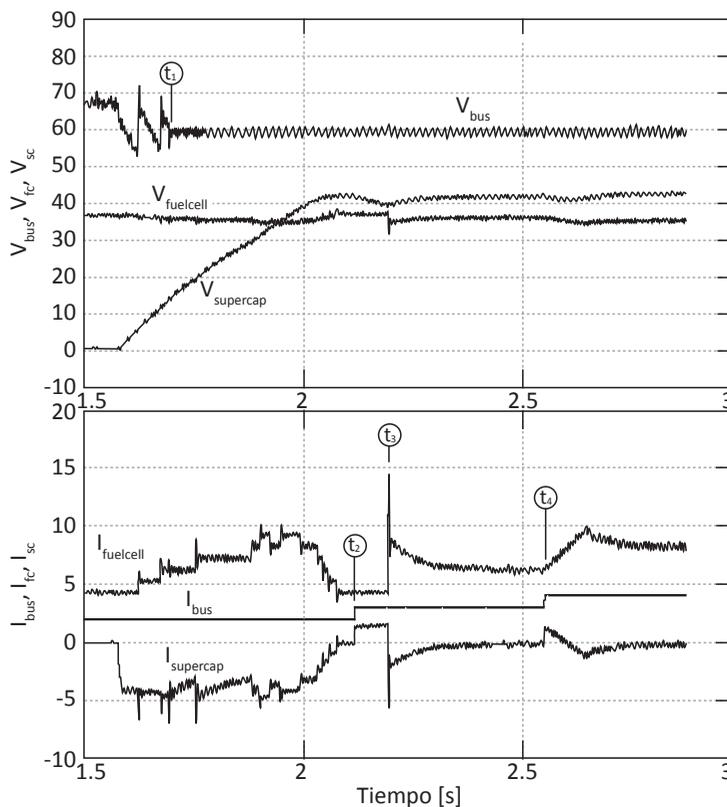


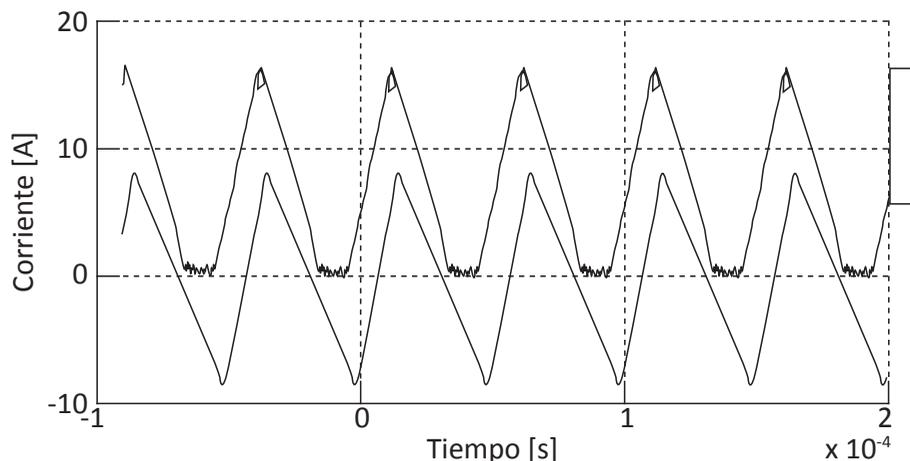
Fig. 9 - Ensayo realizado en la plataforma

En  $t_2$  se incrementa la potencia demandada, la cual es suministrada por el SC, iniciando un proceso de descarga. En  $t_3$  se comienza a calcular el valor de referencia para el lazo de corriente de la FC a partir de la potencia demandada por la carga y la necesaria por el SC para mantener su tensión en 42V.

Finalmente, en  $t_4$  cuando se incrementa nuevamente la potencia demandada por la carga, se observa cómo, inicialmente es provista por el SC hasta que la FC alcanza el nuevo valor y puede suministrarlo ella.

En la Fig. 10 se muestran en detalle las corrientes  $I_{fc} - I_{sc}$  donde puede observarse que el ripple en ambas

cumple las especificaciones de diseño buscadas. Además la corriente correspondiente al convertidor de la FC indica que el mismo está operando en modo de conducción discontinua, mientras que aquella correspondiente al del SC opera en conducción continua, con valor medio de corriente cercano a cero.



*Fig. 10 - Corriente en los convertidores*

## CONCLUSIÓN

En este trabajo se detallaron los lineamientos principales para el desarrollo de una plataforma experimental de generación híbrida versátil, basada en una Pila de Combustible y Supercapacitores. Se describió la constitución y operación de los módulos que la conforman, indicando las pautas principales de diseño. Se dio especial atención al diseño e implementación de los convertidores electrónicos, la instrumentación electrónica y los sistemas de control, supervisión y protección. Finalmente el sistema fue probado en su conjunto, demostrando su correcto funcionamiento para las condiciones de ensayo impuestas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo de la UNLP, el CONICET, la SECyT, Argentina; la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID-A026279/09), la Universitat Politècnica de Catalunya y CSIC, España.

## REFERENCIAS

- Farooque and Maru, "Fuel Cells-The Clean and Efficient Power Generators," Proceedings of the IEEE, Vol.89, N°2 pp.1819-1829, December 2001.
- Ellis, Von Spakovsky and Nelson, "Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century," Proceedings of the IEEE, Vol.89, N°12, pp.1808-1818, Dec. 2001.
- Suh, Stefanopoulou, Coordination of converter and fuel cell controllers. International Journal of Energy Research. 29(12): 1167-1189. 2005.
- Barbir, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Ed. Elseiver, pp. 50-135, 2005.
- Nexa™ (310-0027) Power Module User's Manual, Ballard Power Systems Inc.
- Semikron®, Semistack SKS 75F B6CI 40 V12 Datasheet, 20/4/2007.

McLyman “Transformer and Inductor Design Handbook”, 2nd Ed., Dekker, pp. 252-277, 1988.

Jong-Hoon Kim†, Min-Ho Jang, Jun-Seok Choe, Do-Young Kim, Yong-Sug Tak, and Bo-Hyung Cho. “An Experimental Analysis of the Ripple Current Applied Variable Frequency Characteristic in a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell”. *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 1, January 2011.

Mohan, Undeland, and Robbins, “Power Electronics Converters, Applications and Design,” 3rd ed. John Wiley & Sons, 2001.

Maxwell Technologies, Inc. BMOD0165 P048 Datasheet, Document number: 1009365.8.

Maxwell Technologies, Inc. Applications Note: “BOOSTCAP® Ultracapacitor Cell Sizing”, Document number: 10073627.

Moré, Puleston, Kunusch, Riera, Colomer, “Sliding Mode Control of an Autonomous Parallel Fuel Cell-Supercapacitor Power Source”. 5th International Workshop on Hydrogen and Fuel Cells, WICaC 2010. Centro de Convenciones de la UNICAMP, Campinas, Brasil. 26 al 28 de octubre de 2010.