

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL SUPERVISOR PARA SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE

Jerónimo J. Moré ^{*,1} Paul F. Puleston ^{**2}
Cristian Kunusch ^{***3} Jordi Riera ^{***3}

** CONICET y LEICI, Dpto. de Electrotecnia, Fac. de Ingeniería,
Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina*

*** IIF Marie Curie Fellow (financiado FP7-PIIF-911767) en IRI,
CSIC-UPC, Barcelona, España. Permanente CONICET y
LEICI, Dpto. de Electrotecnia, Fac. de Ingeniería, Universidad
Nacional de La Plata, La Plata, Argentina*

**** Institut de Robòtica i Informàtica industrial (CSIC-UPC),
Parc Tecnològic de Barcelona. C/ Llorens i Artigas 4-6. 08028
Barcelona, Spain*

Resumen: En el presente artículo se muestra el desarrollo, implementación y resultados experimentales de un control supervisor para un sistema híbrido de generación de energía eléctrica basado en una pila de combustible tipo PEM. El núcleo de este sistema está formado por una pila de combustible tipo PEM y un banco de supercapacitores. La primera se encuentra vinculada a un bus de corriente continua mediante un convertidor DC/DC unidireccional, mientras que los supercapacitores están conectados al bus mediante un convertidor bidireccional. El sistema se completa mediante un módulo de energía alternativa, en este caso una turbina eólica, junto con un electrolizador que genera el hidrógeno a ser utilizado por la pila de combustible. El control supervisor diseñando gestiona el flujo de energía garantizando que la carga conectada al bus siempre se encuentre correctamente alimentada. Por otro lado, debe asegurarse, de ser posible, de mantener cargados los supercapacitores, así como el reservorio de hidrógeno. Con estos objetivos el control supervisor es responsable de generar las referencias de potencia para cada subsistema, las cuales deben ser oportunamente satisfechas por controladores dedicados en cada uno de ellos. El esquema propuesto es implementado y evaluado experimentalmente en una estación de ensayo híbrida bajo condiciones extremas de funcionamiento.

Palabras Claves: Sistemas Híbridos de Generación, Pilas de Combustible, Supercapacitores, Energía Alternativa, Control Supervisor

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los sistemas híbridos de generación de energía eléctrica renovable han

despertado un gran interés en todo el mundo. Este interés se debe principalmente a la nueva conciencia medioambiental y al agotamiento de los combustibles fósiles. En este sentido, los sistemas basados en Pilas de Combustible (PC) resultan una elección prometedora debido a su alta eficiencia y vida útil (Larminie and Dicks, 2003). En particular, los sistemas con PC tipo PEM son intensamente estudiados para aplica-

¹ Estudiante de Doctorado FI-UNLP, Becario Doctoral CONICET - jmore@ing.unlp.edu.ar

² Profesor Titular FI-UNLP, Investigador Independiente CONICET

³ Investigador CSIC

ciones móviles (Sedghisigarchi *et al.*, 2011) y estacionarias (de Bruijn and Veltman, 2011).

Uno de los problemas asociados a las pilas de combustible tipo PEM es que deben evitarse cambios abruptos en su corriente, de manera de prevenir daños irreversibles en las membranas. Por este motivo, las pilas de combustible suelen combinarse en sistemas que cuenten con un canal de respuesta rápida. En particular, los Supercapacitores (SC) aparecen como una solución eficiente (Cheng, 2010).

Con la idea de formar un Sistema Híbrido (SH) completamente funcional a partir de energías renovables, se hace necesario incorporar algún esquema de generación de hidrógeno sustentable. En este sentido, la incorporación de una turbina eólica en combinación con un electrolizador suele ser una solución muy versátil (Saur, 2008). Esta topología permite almacenar energía en hidrógeno, cuando existe un excedente de potencia de viento, para ser utilizada cuando sea necesaria por la PC. Sin embargo, se requieren estrategias de supervisión y gestión de energía para asegurar el correcto funcionamiento de cada subsistema y del sistema completo. Por lo tanto, este trabajo aborda el desarrollo e implementación de un sistema de supervisión y control para un SH basado en PC.

Un esquema en bloques del SH bajo consideración se muestra en la Fig. 1. En la misma pueden verse los distintos flujos de potencia que deben ser gestionados por el control supervisor: la potencia entregada por la turbina eólica P_V y la PC P_{PC} ; la potencia entregada a la carga del sistema P_{carga} y al electrolizador P_E y la potencia entregada o absorbida del bus por los SC P_{SC} . Por otro lado, también se muestran los convertidores DC/DC que conectan a la PC y a los SC al bus, cuyo control dedicado también es abordado en este trabajo.

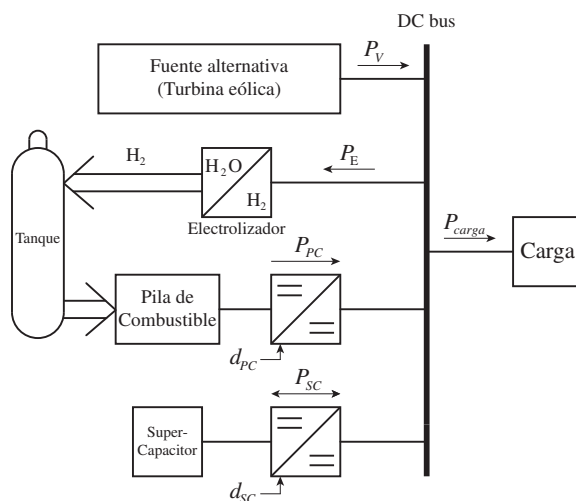


Fig. 1. Diagrama en bloques del sistema híbrido

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La plataforma híbrida sobre la que se realizaron los ensayos experimentales del presente artículo ha sido construida en el *Laboratorio de Pilas de Combustible* del *Institut de Robòtica i Informàtica industrial (CSIC-UPC)*, Barcelona, España. La misma consta de un núcleo principal basado en una pila de combustible tipo PEM y un banco de supercapacitores, conectados a un mismo bus de corriente continua por medio de un convertidor DC/DC elevador unidireccional y otro bidireccional, respectivamente. Los dos convertidores tienen la función de adaptar las tensiones variables de ambos dispositivos a otra de valor fijo.

La PC utilizada es un módulo de potencia *Nexa*[®] de la empresa *Ballard*[®]. La misma puede entregar hasta un máximo de $1,2kW$, con una tensión de continua variable entre 26 y $48V$ aproximadamente. La corriente nominal es de $46A$. Cabe destacar que la PC se encuentra conectada al convertidor DC/DC por medio de un filtro de segundo orden para la corriente de la misma. La frecuencia de corte de este filtro es de aproximadamente $500Hz$.

Se ha instalado un SC *Maxwell*[®] que cuenta con una capacidad de $165F$. La tensión nominal de trabajo es de $48V$, pudiendo alcanzar como máximo el valor de $52V$. La corriente media máxima que puede soportar en forma continua es de $98A$ y presentan una resistencia serie de aproximadamente $6m\Omega$.

Ambos convertidores tipo elevador que conectan la PC y los SC al bus de continua están implementados mediante dos columnas de IGBT's *Semikron*[®], cuya frecuencia máxima de conmutación es de $20kHz$. La tensión máxima que soporta cada llave es de $400V$ y una corriente media de $75A$. Los inductores de ambos convertidores DC/DC tienen una inductancia de $35\mu H$ y la capacidad del bus es de $2720\mu F$.

El sistema cuenta además con una fuente y una carga programables conectadas directamente al bus. La fuente programable (FP) es una *NL Source-Sink* de *Höcherl & Hackl GmbH*[®]. La misma es básicamente una fuente unidireccional en tensión, pero bidireccional en corriente. La tensión máxima en bornes es de $80V$ y puede entregar (o absorber) hasta $3.2kW$. Mediante este dispositivo es posible emular el comportamiento de una fuente alternativa de potencia del SH. En particular, se lo utilizó para emular la inyección de potencia al bus de un generador eólico sometido a un perfil de viento establecido por el usuario.

Por su parte, la carga programable (CP) instalada es una *ZL Electronic DC load*, también de *Höcherl & Hackl GmbH*[®], pudiendo trabajar con una tensión máxima en bornes de $80V$ y con

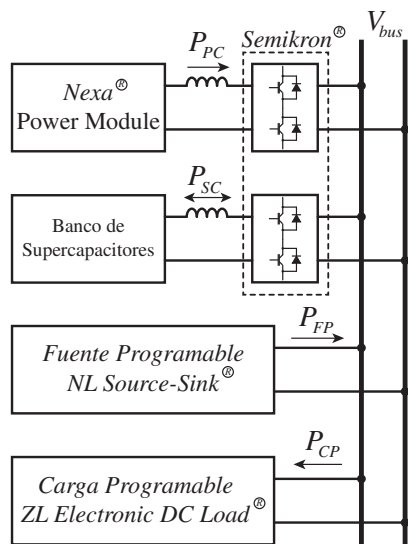


Fig. 2. Diagrama en bloques del sistema híbrido

una potencia máxima de $3.4kW$. La misma es altamente versátil, pudiendo representar la carga externa del SH y, de no existir un electrolizador real, permite emularlo incorporando su consumo a la potencia externa demandada. Este esquema permite en el futuro la incorporación sencilla de un electrolizador real al sistema, aprovechando el excedente de potencia de la fuente alternativa para producir H_2 .

En la Fig. 2 se muestra un diagrama en bloques de la plataforma híbrida aquí descrita. Se debe notar que la relación entre las potencias de la FP (P_{FP}) y de la CP (P_{CP}) en esta figura con las potencias P_V , P_{carga} y P_E de la Fig. 1 serán indicados más adelante. Es importante destacar que, sin pérdida de generalidad, si bien este sistema permite trabajar con cargas de tensión continua, su funcionamiento podría extenderse a cargas de tensión alterna mediante la incorporación de uno o más inversores conectados al bus.

3. ESTRATEGIA DE CONTROL

El objetivo de control principal del SH es alimentar a la carga con la potencia que demande a una tensión fija del bus de continua. De la misma manera, y mientras sea posible, mantener cargados los SC y producir hidrógeno para que sea almacenado en el tanque de la PC. Tal como se introdujo, dadas las particularidades de los sistemas componentes (tales como la variabilidad del viento y las limitaciones en el funcionamiento de las PC), resulta crítico contar con un eficiente control supervisor que asegure que los flujos de energía sean distribuidos convenientemente entre todos los subsistemas. Para su diseño, es importante conocer las capacidades y limitaciones principales de cada subsistema, los cuales serán analizadas a continuación.

La PC es capaz de entregar potencia en forma ininterrumpida al bus, siempre y cuando exista el abastecimiento suficiente de hidrógeno. Sin embargo, cambios rápidos en su corriente pueden producir caídas excesivas en su tensión de salida y puntos calientes sobre las membranas poliméricas. Esto podría producir la salida de funcionamiento o daños irreversibles en la misma. Por este motivo, la estrategia de supervisión debe tener en cuenta que es importante limitar la velocidad de cambio de la corriente de la PC, de manera de asegurar un funcionamiento adecuado.

Por otro lado, los SC tiene la característica de ser capaces de entregar o absorber corriente rápidamente. Esto lo vuelve un complemento perfecto para las PC, pudiendo complementar la potencia entregada por la pila de combustible en los intervalos de tiempo en que la misma se encuentra limitada.

Finalmente, la turbina eólica es capaz de producir potencia siempre y cuando el viento se encuentre dentro de un rango de trabajo adecuado. Esto hace necesario aprovechar al máximo la potencia disponible de viento mientras sea posible. Lo mismo puede lograrse, por ejemplo, entregando toda la potencia necesaria a la carga y, en caso de que fuera superior, almacenar la restante en los SC o en forma de hidrógeno.

Teniendo en cuenta las características hasta aquí descritas, es posible abordar el diseño del control supervisor, así como también el de los controladores dedicados para los convertidores DC/DC. Las próximas secciones detallan este proceso.

3.1 Control Supervisor

En primer lugar, se calcula la referencia para el módulo de energía alternativa (en este trabajo se considera un sistema eólico). Cabe destacar que el control dedicado interno del módulo eólico no es tema de este trabajo, pero se asume que el mismo puede operar en dos modalidades. Sea maximizar la potencia extraída del viento o limitado para seguir una referencia fijada de potencia variable. Con la finalidad de obtener la potencia que debe entregar, primero se computa la potencia demandada en el bus:

$$P_{tot,ref} = P_{carga} + P_{E,ref} + P_{SC,c}, \quad (1)$$

donde P_{carga} es la potencia de carga, $P_{E,ref}$ es la potencia de referencia del electrolizador y $P_{SC,c}$ es la potencia requerida para cargar o descargar los SC, dependiendo de la tensión del mismo (las cuales se tratarán más adelante en esta subsección).

Es importante notar que si la potencia disponible de viento es mayor que $P_{tot,ref}$, entonces el subsistema eólico debe limitarse y es responsable

de entregar toda la potencia (1). Por otro lado, si la potencia de viento disponible es inferior a P_{total} , el subsistema eólico debe entregar el máximo disponible. Entonces, siendo $P_{V,ref}$ la referencia del sistema eólico, resulta:

$$P_{V,ref} = \begin{cases} P_{V,max} & P_{V,max} < P_{tot,ref} \\ P_{tot,ref} & P_{V,max} \geq P_{tot,ref} \end{cases}, \quad (2)$$

donde $P_{V,max}$ es la máxima potencia que puede extraer la turbina al viento, función de la velocidad del mismo en cada instante.

Para calcular las potencias de referencia para el electrolizador y la PC, debe tenerse en cuenta que ambos no deben funcionar al mismo tiempo, de manera de maximizar la eficiencia del sistema. Para el caso del electrolizador debe considerarse la cantidad de hidrógeno en el tanque de almacenamiento y la disponibilidad de potencia de viento extra. En otras palabras, si el tanque está lleno, el electrolizador no debe producir hidrógeno. Si el tanque no está lleno, la potencia entregada al electrolizador debe ser igual al exceso de potencia de viento. Entonces, definiendo Vol_{H_2} y $Vol_{H_2,max}$ como el volumen de hidrógeno actual y máximo admisible en el tanque respectivamente, y considerando el balance de potencia de viento $P_{v,bal}$ como:

$$P_{v,bal} = P_V - P_{carga} - P_{SC,c}, \quad (3)$$

donde P_V es la potencia de viento real entregada al bus de continua. De esta manera, la referencia para el electrolizador puede obtenerse como:

$$P_{E,ref} = \begin{cases} 0 & Vol_{H_2} \geq Vol_{H_2,max} \text{ o } P_{v,bal} < 0 \\ P_{v,bal} & 0 \leq P_{v,bal} \leq P_{E,max} \\ P_{E,max} & c.c. \end{cases}, \quad (4)$$

donde $P_{E,max}$ es la máxima potencia que puede ser entregada al electrolizador.

La referencia de potencia para la PC se calcula teniendo en cuenta la potencia que no puede ser entregada por el módulo eólico a la carga y haciendo uso del balance de potencia $P_{v,bal}$. Notar que esto asegura que la PC y el electrolizador no operen simultáneamente, como se desea. Por lo tanto, resulta:

$$P_{PC,ref} = \begin{cases} -P_{v,bal} & P_{v,bal} < 0 \\ 0 & c.c. \end{cases}. \quad (5)$$

La potencia de carga/descarga de los SC $P_{SC,c}$ se calcula basada solamente en la tensión actual del mismo:

$$P_{SC,c} = K_c \cdot (V_{SC,ref} - V_{SC}) + K_I \cdot \int (V_{SC,ref} - V_{SC}) dt, \quad (6)$$

donde $V_{SC,ref}$ es la tensión de referencia deseada en los SC, V_{SC} la tensión actual de los SC, K_c una ganancia proporcional y K_I una ganancia

integral, que deben ser diseñadas para obtener una dinámica de carga/descarga deseada, evitando una sobrecarga de las fuentes de energía. Notar que, por ejemplo, grandes valores de K_c cargarán rápidamente los SC, pero un pequeño error en tensión demandará grandes valores de potencia en las fuentes. Es importante remarcar que el término integral se hace necesario para anular el error de estado estacionario producido principalmente por las pérdidas en los convertidores de potencia.

En la Fig. 3 se muestra un diagrama de flujo de cada iteración del control supervisor desarrollado en esta sección:

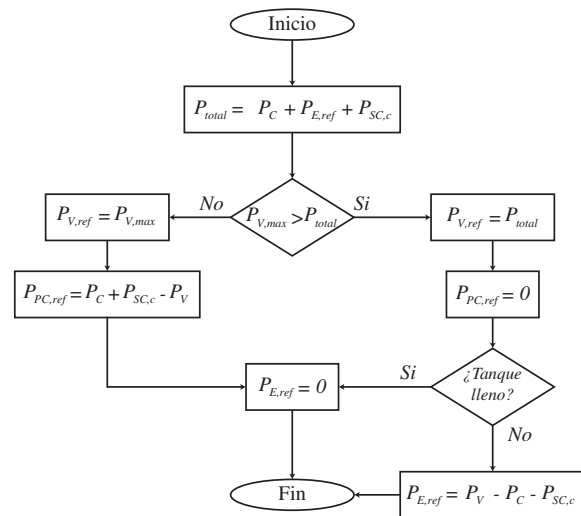


Fig. 3. Diagrama de flujo de la estrategia de supervisión

3.2 Controladores Dedicados

Como se mencionara en la sección anterior, en el presente trabajo se asume que el subsistema eólico cuenta con un controlador dedicado que permite extraer el máximo disponible en el viento o limitar su valor a un máximo de referencia, inyectando potencia en el bus. De la misma manera, se asume que el electrolizador cuenta con un controlador que le permite seguir la referencia de potencia calculada por el control supervisor.

Por otro lado, se hace necesario contar con dos controladores para los convertidores tanto de la PC como de los SC. En este sentido, se busca cumplir con los requerimientos detallados al inicio de la sección: fijar la tensión del bus y limitar la velocidad de cambio de la corriente de la pila de combustible.

Por lo tanto, se diseñó un compensador tipo PI para controlar la corriente media de entrada del convertidor de la PC, cuya referencia está limitada en la velocidad de cambio a un valor seguro. Un esquema general se muestra en la Fig. 4(a). Cabe aclarar que la referencia de corriente del controlador se obtiene a partir de la referencia de potencia calculada por el supervisor. Este

esquema permite asegurar que la PC entrega la potencia requerida al sistema y asegurar que la velocidad de cambio de su corriente está debidamente controlada.

En cambio, el controlador del convertidor de los SC se diseñó para regular la tensión del bus de continua. Con este fin, se colocaron dos controladores en cascada, uno interno que controla la corriente del convertidor y uno externo que genera la referencia de corriente en función de la tensión del bus. Un esquema general de este controlador se muestra en la Fig. 4(b).

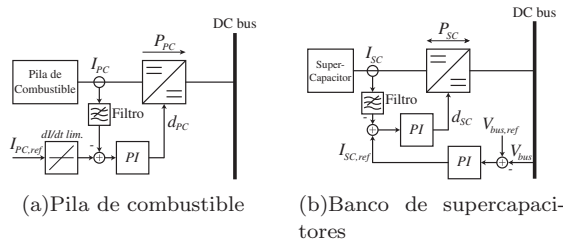


Fig. 4. Esquemas de control de los convertidores DC/DC

Cabe destacar que d_{PC} y d_{SC} indican el ciclo de trabajo de la señal PWM aplicada al convertidor de la PC y de los SC respectivamente.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La presente sección presenta los resultados experimentales de la implementación del control supervisor y los controladores dedicados de los convertidores. Cabe destacar que los ensayos fueron realizados bajo condiciones extremas de variación tanto de la carga como de viento. En aplicaciones reales, estas variaciones suelen ser mucho más lentas, pero es de interés mostrar el buen desempeño de las estrategias desarrolladas aún en condiciones tan extremas.

Para la realización de las experiencias, el módulo eólico fue emulado mediante FP, como se indicara oportunamente. En este sentido, se ajustó la referencia de la mencionada fuente a partir de la potencia $P_{V,ref}$ calculada por el supervisor. Por otro lado, la suma de la potencia de la carga externa P_{carga} y del electrolizador $P_{E,ref}$ fue utilizada como referencia para la CP. Por lo tanto, las potencias P_{FP} y P_{CP} de la Fig. 2 resultan de la siguiente manera:

$$P_{FP} = P_V \quad (7)$$

$$P_{CP} = P_{carga} + P_E \quad (8)$$

Cabe destacar además que para la emulación de la turbina eólica y del electrolizador mediante la FP y la CP respectivamente, se incorporaron dinámicas de primer orden al cambio de las referencias. Esto se debe principalmente a la

representación de las dinámicas asociadas a este tipo de sistemas, como ser la lenta dinámica mecánica de los molinos eólicos.

La tensión de bus de referencia fue configurada en 75V, mientras que la tensión de referencia de los SC fue seleccionada en 40V. Por otra parte, se configuró un perfil de viento tal que permitía al sistema disponer de un máximo de 850W y un mínimo de 250W de potencia extraíble, aproximadamente.

En la Fig. 5 se muestra la variación de la potencia demandada por la carga del sistema. Aquí puede apreciarse que las variaciones de carga fueron representadas como escalones de potencia sobre el sistema. Por su parte, la Fig. 6 y Fig. 7 muestran la tensión y corriente en el bus de continua. De estas figuras puede concluirse el buen comportamiento de la regulación de tensión de bus, aún ante grandes cambios en la potencia demandada por la carga.

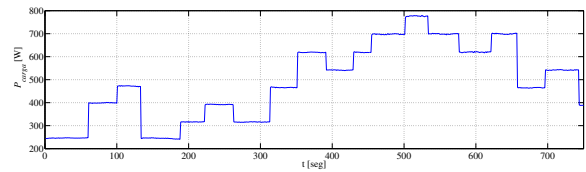


Fig. 5. Potencia demandada por la carga

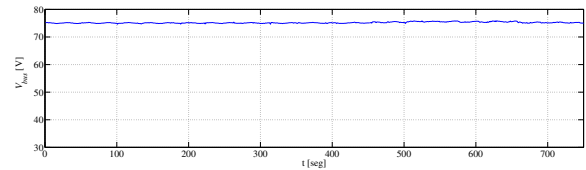


Fig. 6. Tensión del bus de continua

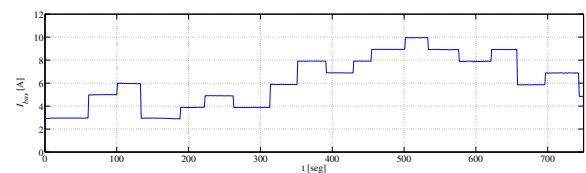


Fig. 7. Corriente en la carga

En la Fig. 8 se muestran la potencia de viento extraíble, la potencia de referencia de subsistema eólico y la potencia real aportada por el mismo. En esta figura puede apreciarse como en la primer etapa, cuando la potencia extraíble al viento es grande, pero la demanda de potencia en la carga no lo es tanto, el subsistema eólico opera limitando al valor máximo que puede ser entregado al bus. Luego, cuando la demanda de la carga aumenta, el sistema busca operar al máximo extraíble. En esta figura además puede apreciarse la dinámica con que la turbina sigue la referencia, lo cual fuera programado en el emulador.

Por otra parte, la Fig. 9 muestra la potencia entregada al electrolizador. Puede verse que mientras la turbina eólica limita la potencia que

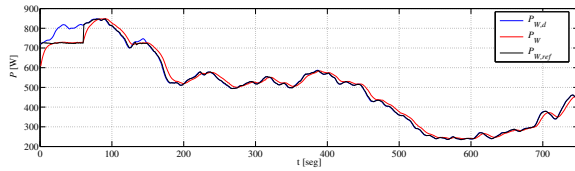


Fig. 8. Potencia disponible y entregada al bus de continua

entrega al bus, el electrolizador trabaja a su máxima potencia, configurada en 500W. Cuando la demanda de potencia en la carga aumenta, la potencia en el electrolizador se reduce, hasta el límite de hacerse cero cuando la potencia extraíble del viento es inferior a la demandada por la carga.

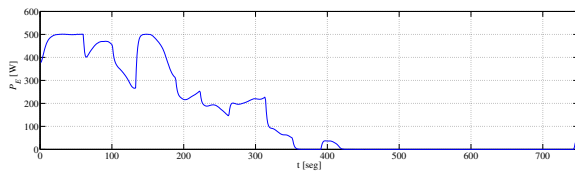


Fig. 9. Potencia entregada al electrolizador

En la Fig. 10 se muestra la potencia entregada por la PC. En esta figura puede apreciarse que mientras el electrolizador se encuentra tomando potencia, la PC no lo hace. Por el contrario, cuando la PC entrega potencia, el electrolizador no se encuentra consumiendo energía.

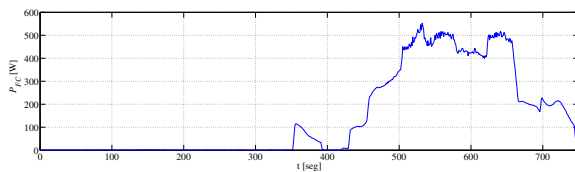


Fig. 10. Potencia entregada por la Pila de Combustible

La Fig. 11 muestra la potencia que entregan o absorben los SC. En este caso se ve como responden rápidamente a todos los cambios de potencia de demanda de la carga, complementando la potencia de la turbina eólica y de la PC cuando es necesario. Luego de los transitorios rápidos, la potencia tiende a cero, a medida que los SC se cargan o descargan al valor de referencia.

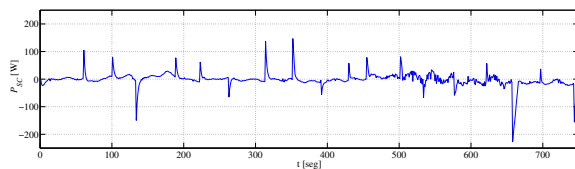


Fig. 11. Potencia entregada/absorbida por el banco de Supercapacitores

Las Fig. 12 y 13 muestran la tensión y corriente de la PC. En esta última además, se grafica la referencia de corriente entregada al controlador dedicado. Aquí puede verse entonces el límite en la variación de la misma que impone el controlador.

Por último, en las Fig. 14 y 15 se muestran la tensión y corriente en los SC. Nuevamente puede

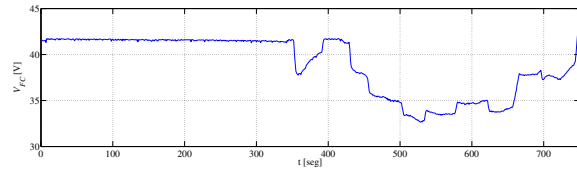


Fig. 12. Tensión de la Pila de Combustible

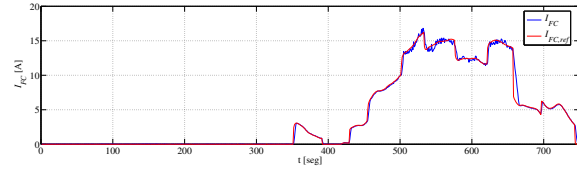


Fig. 13. Corriente de la Pila de Combustible

apreciarse la rápida respuesta del mismo ante cambios en la carga y la lenta recarga al valor de referencia en los intervalos en que se mantiene fija.

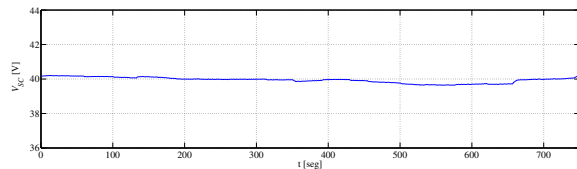


Fig. 14. Tensión del banco de Supercapacitores

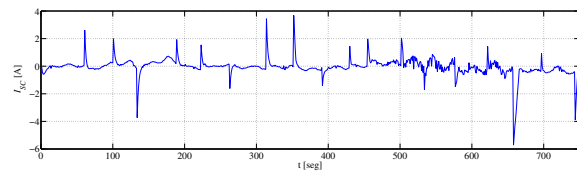


Fig. 15. Corriente del banco de Supercapacitores

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentó el desarrollo e implementación de un control supervisor para un sistema híbrido de conversión de energía basado en una pila de combustible tipo PEM. El mismo fue motivado por la necesidad de controlar los flujos de energía involucrados en el sistema, provenientes de fuentes inherentemente variables o con limitaciones de funcionamiento. En particular, se trabajó sobre un SH que incorpora un módulo eólico como fuente alternativa de energía, además de un electrolizador para aprovechar el excedente de energía extraíble del viento. La principal limitación considerada en la PC fue el hecho de que la corriente no debe variarse abruptamente, de manera de evitar posibles daños irreversibles en la misma. Esta limitación, obliga a contar con otro subsistema de respuesta rápida, de manera de asegurar que la carga siempre pueda ser alimentada con la tensión y corriente requerida.

De esta manera, el control supervisor fue diseñado para calcular las referencias de potencia de cada

subsistema involucrado. Para este diseño se consideró que cada subsistema cuenta con un controlador dedicado capaz de seguir las mencionadas referencias. En particular, en este trabajo también se desarrollaron e implementaron los controladores dedicados para los convertidores DC/DC de la PC y de los SC, de manera que cumplan con estas especificaciones.

Para la implementación de los controladores, debió además emularse el comportamiento de la turbina eólica y del electrolizador por medio de una fuente y una carga programable respectivamente. La estructura utilizada permite fácilmente la incorporación de estos dispositivos junto con sus controladores dedicados.

Los resultados obtenidos de los ensayos experimentales muestran el eficiente funcionamiento tanto del control supervisor como de los controladores locales de la PC y de los SC. En particular, se observa que ante fuertes variaciones de carga y una gran variabilidad en el viento, la carga siempre es alimentada con la potencia demandada. Por otro lado, se ve que el control supervisor se encarga de mantener los SC cargado al valor de referencia luego de los transitorios rápidos y utiliza el excedente de energía extraída del viento para generar hidrógeno. Finalmente, también se aprecia que se cumple la restricción fuerte de que la PC y el electrolizador no funcionen al mismo tiempo, de manera de maximizar el rendimiento del SH.

Trabajos a futuro sobre este sistema involucrarán la incorporación de otras variables del sistema en el control supervisor, de manera de determinar el estado de funcionamiento del mismo. Por ejemplo, se tendrán en cuenta variables de performance que permitan evaluar el estado de la PC y su correcto funcionamiento (tal como estequiometrías de gases y contenido de agua en las membranas). Por otro lado, también es de interés el desarrollo de controladores basados en técnicas de control no lineal, que brinden mayor robustez y confiabilidad al sistema.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), CONICET, y SECyT, de Argentina; con el aporte de FP7-PEOPLE-2011 Marie-Curie Action, Proyecto ACOFC (GA-293876); y por la Universitat Politècnica de Catalunya, el MICINN-CICYT proyecto DPI2011-25649, la CSIC, Programa de Investigación JAEDOC y la AECID con el proyecto A/026279/09, de España. Todos los ensayos experimentales fueron realizados en el Laboratorio de Pilas de Combustible del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (CSIC-UPC,

Barcelona) y los autores desean agradecer a todo el personal técnico especializado.

REFERENCIAS

- Cheng, Yonghua (2010). Assessments of energy capacity and energy losses of supercapacitors in fast charging-discharging cycles. *Energy Conversion, IEEE Transactions on* **25**(1), 253–261.
- de Bruijn, F. and P. Veltman (2011). Pem fuel cells for telecom applications. In: *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International*. pp. 1–6.
- Larminie, J. and A. Dicks (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. second ed.. John Wiley & Sons Inc.
- Saur, Genevieve (2008). Wind-to-hydrogen project: Electrolyzer capital cost study. *National Renewable Energy Report (NREL) Tech Report*.
- Sedghisigarchi, K., A. Davari and P. Famouri (2011). Dynamic modeling and control of a fuel cell for electric vehicle applications. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*. pp. 1–5.