

Implementación y validación experimental del control de un sistema híbrido basado en pilas de combustible para vehículos eléctricos

Anderson J.L.*[†], Moré J.J.[†], Puleston P.F.[†], Roda V.[‡] y Costa-Castelló R.[‡]

[†]Instituto de investigación en Electrónica, Control y Procesamiento de señales (LEICI), FI UNLP - CONICET, La Plata, Argentina

[‡]Institut de Robòtica i Informàtica industrial (IRI), CSIC-UPC, Barcelona, España.

*jorgeluis.anderson@ing.unlp.edu.ar

Resumen—En este trabajo se presenta el diseño, implementación y validación experimental de un controlador por modos deslizantes de segundo orden aplicado a un módulo de generación híbrida basado en una pila de combustible y supercapacitores. El controlador desarrollado se encuentra basado en el algoritmo *Super-Twisting*. Para simplificar el diseño de las acciones de control del sistema, se emplea una transformación no lineal que permite independizar el diseño de las variables de deslizamiento.

El sistema de control propuesto es ensayado experimentalmente en una plataforma que incorpora una pila de combustible de 1.2kW y supercapacitores de uso comercial. El módulo de generación híbrida controlado es entonces evaluado para satisfacer la demanda de potencia de un vehículo eléctrico en condiciones de conducción urbana, con la presencia de múltiples etapas de aceleración y desaceleración. Los resultados obtenidos muestran una buena regulación de la tensión del bus común y un seguimiento robusto de las referencias impuestas, aún frente a la presencia de fuertes variaciones y perturbaciones de la potencia de carga.

Index Terms—Modos Deslizantes de Segundo Orden, Super-Twisting, Sistema de Generación Híbrida, Energías renovables.

I. INTRODUCTION

La popularidad de los Vehículos Eléctricos (VE) ha ido aumentando en los últimos años, no sólo por su reducción en la emisión de dióxido de carbono al medioambiente, sino también por su elevado rendimiento energético [1], [2]. Se ha establecido que los VE logran un rendimiento mayor al 75 %, en comparación con el bajo 25 % de los vehículos de combustión tradicionales [3]. Dicha energía no aprovechada es transformada en calor, contribuyendo así en un empeoramiento del calentamiento global.

Existen diversas topologías de vehículos eléctricos, siendo las más aceptadas aquellas que emplean Pilas de Combustible (PCs), baterías de litio o SuperCapacitores (SC) [3]. Adicionalmente en los últimos años, con el avance de la electrónica de potencia, se han ido estableciendo nuevas topologías que involucran la combinación de estas fuentes de energía, conformando así un Sistema de Generación Híbrida (SGH). La combinación de estas fuentes de energía tiende a suplir las deficiencias individuales de cada una, logrando un incremento de la eficiencia global del sistema.

En particular, las estructuras que involucran pilas de combustible en combinación con supercapacitores son especialmente promisorias. Las PCs con membrada de intercambio de protones presentan interesantes características para su uso en la industria del transporte, debido a su baja temperatura de operación, elevada eficiencia y densidad de energía, y reducido peso y volumen [4]. Sin embargo, estos dispositivos no son apropiadas para suministrar variaciones abruptas de potencia, producto de una aceleración/desaceleración del vehículo, ni tampoco para estrategias de freno regenerativo [5]. De esta manera, su combinación con un banco de SC de alta densidad de potencia posibilita satisfacer la demanda de una carga fuertemente variable.



Figura 1. Plataforma experimental del sistema de generación híbrida basado en PC/SC implementado en el Institut de Robòtica i Informàtica industrial (CSIC-UPC), Barcelona, España.

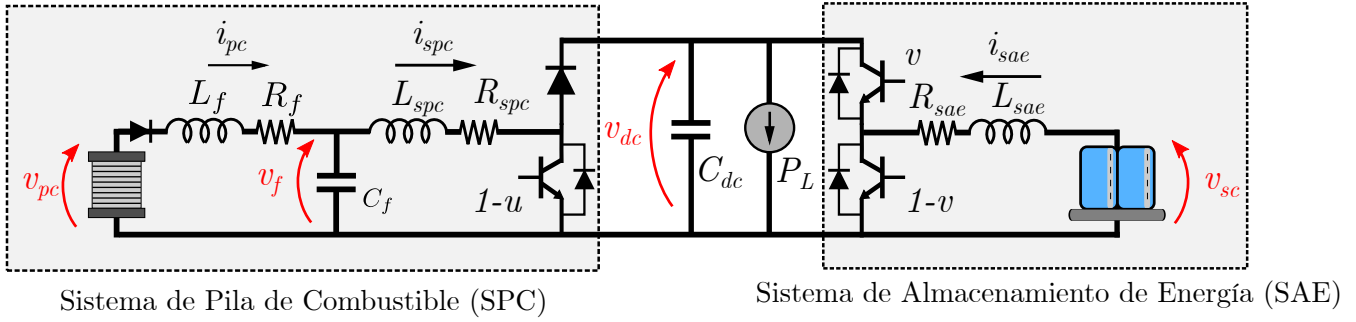


Figura 2. Diagrama eléctrico del sistema de generación híbrido ensayado experimentalmente.

En este contexto, las estrategias de control aplicadas sobre el sistema híbrido juegan un papel fundamental para maximizar su rendimiento general [6]. Particularmente, los algoritmos de control por Modos Deslizantes (MD) han sido ampliamente aceptados para su aplicación en sistemas de potencia, existiendo en la actualidad numerosos trabajos en la literatura [7], [8]. Las características de robustez frente a perturbaciones e incertidumbres del sistema que presentan estos algoritmos permiten el diseño de controladores robustos, que aseguran la estabilidad y eficiencia del sistema en todo el rango de operación [9].

Dentro de estos algoritmos, el control por Modos Deslizantes de Segundo Orden (MDSO) *Super-Twisting* mantiene las deseadas características de robustez y convergencia en tiempo finito del MD tradicional, mientras logra una importante reducción del *chattering* del sistema controlado [10]. Esta disminución en el *chattering* resultante permite reducir las pérdidas del sistema, aumentando su eficiencia y prolongando su vida útil.

En este trabajo se realiza la implementación y validación experimental de un control por modos deslizantes de segundo orden *Super-Twisting* para un sistema de generación híbrida, apto para su empleo en vehículos eléctricos, conformado por una pila de combustible de 1.2kW y un banco de supercapacitores. El sistema de control desarrollado es evaluado en una plataforma experimental (ver Fig. 1) considerando la demanda de potencia de un vehículo eléctrico operando bajo un ciclo de conducción urbano normalizado.

II. SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDA BASADO EN PC/SC BAJO ESTUDIO

En esta sección se describe el sistema híbrido de energía empleado en los ensayos experimentales. Los diferentes componentes que integran el sistema se detallan en la Fig. 2. En esta topología, la pila de combustible es la encargada de suministrar la potencia media requerida por la carga. De esta manera, el banco de supercapacitores deberá satisfacer las variaciones abruptas de potencias mientras regula la tensión del bus.

II-A. Plataforma experimental del sistema híbrido.

La Pila de Combustible comercial empleada en los ensayos es una Ballard Nexa de 1.2kW [11], con tensión nominal

de 26V. La tensión de salida suministrada por la PC varía fuertemente con la potencia entregada, en conjunto con las alteraciones de temperaturas y presiones parciales sobre la pila, entre otros factores. Estas características, en combinación con su lenta dinámica e imposibilidad de absorción de corriente, hacen de las Pilas de Combustibles particularmente pobres reguladores de tensión. Por esta razón, la PC es integrada al Sistema de Generación Híbrida por medio un sistema de acondicionamiento de potencia (ver Fig. 2), conformando un Sistema de Pila de Combustible (SPC).

En la plataforma estudiada, el SPC se encuentra basado en un convertidor DC/DC elevador unidireccional operando a una frecuencia de conmutación de 20kHz. Adicionalmente, para mitigar los efectos de las componentes de alta frecuencia del convertidor, la pila de combustible es conectada al convertidor a través de un filtro pasa-bajos de segundo orden [12].

Por otro lado, el Sistema de Almacenamiento de Energía (SAE) esta conformado por un banco de supercapacitores comercial de *Maxwell Technologies*. El módulo utilizado posee una tensión de 48V nominales con una capacidad de 165F [13]. Los SC son conectados al bus común a través de un convertidor elevador bidireccional con frecuencia de conmutación 20kHz.

Las acciones de control de ambos convertidores son generadas a partir de la plataforma de National Instruments cRIO-9047 [14]. Este dispositivo consta principalmente de una FPGA de la familia Kintex-7, en donde los controladores de bajo nivel son implementados. Así mismo, la plataforma permite la medida de todas las variables de control necesarias.

II-B. Modelo del sistema experimental

A partir de lo anterior, considerando el sistema experimental completo, es posible obtener un modelo matemático promediado del sistema, necesario para el análisis y diseño del controlador. Las ecuaciones que describen el comportamiento del Sistema de Pila de Combustible vienen dadas por:

$$L_f \cdot \frac{di_{pc}}{dt} = -v_f - i_{pc} \cdot R_f + v_{pc}(i_{pc}) \quad (1)$$

$$C_f \cdot \frac{dv_f}{dt} = i_{pc} - i_{spc} \quad (2)$$

$$L_{spc} \cdot \frac{di_{spc}}{dt} = v_f - i_{spc} \cdot R_{spc} - v_{dc}u \quad (3)$$

en donde u es el ciclo de trabajo del convertidor unidireccional, el cual es válido para $0 < u_{min} < u < 1$, siendo u_{min} el valor de u que garantiza la operación en modo de conducción continua del sistema.

Asumiendo temperatura y presiones parciales reguladas de la pila, un modelo empírico que permite ajustar experimentalmente la curva de polarización de una PC, compuesta por N_{pc} celdas, viene dado por [15]:

$$v_{pc}(i_{pc}) = N_{pc} \cdot (E_{nl} - A_{pc} \cdot \ln(i_{pc}) - R_{pc} \cdot i_{pc} - m_{pc} \cdot \exp(n_{pc} \cdot i_{pc})) \quad (4)$$

donde E_{nl} es la tensión de la celda sin carga, R_{pc} son las pérdidas ohmicas y A_{pc} es la pendiente de la ecuación de Tafel. Por último, m_{pc} y n_{pc} corresponden a coeficientes obtenidos de forma empírica. El modelo estático descrito en (4) ha sido empleado satisfactoriamente para el análisis de sistemas de potencia que involucran pilas de combustible, y su uso se encuentra ampliamente difundido en la bibliografía [16], [17]. La curva de polarización de la PC empleada en los ensayos experimentales se muestra en la Fig. 3

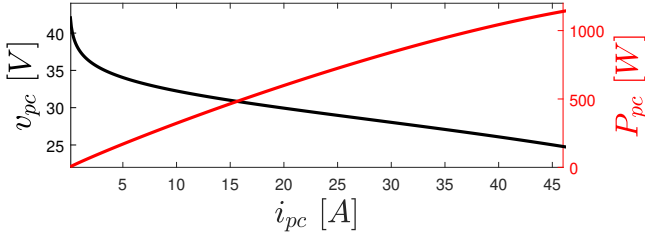


Figura 3. Curva de polarización de tensión y potencia de la Pila de Combustible comercial Ballard Nexa de 1.2kW.

De forma similar, solo a efectos de su empleo en el diseño del controlador propuesto, el Sistema de Almacenamiento de Energía en conjunto con el bus común de tensión son descritos mediante el sistema de ecuaciones:

$$L_{sae} \cdot \frac{di_{sae}}{dt} = v_{sc} - R_{sae} i_{sae} - v_{dc} v \quad (5)$$

$$C_{sc} \cdot \frac{dv_{sc}}{dt} = -i_{sae} \quad (6)$$

$$C_{dc} \cdot \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{spc} u + i_{sae} v - i_{dc} \quad (7)$$

en donde v es el ciclo de trabajo del convertidor bidireccional.

III. CONTROL POR MODOS DESLIZANTES DE SEGUNDO ORDEN

A continuación se presenta el diseño del algoritmo de control por Modos Deslizantes de Segundo Orden evaluado en la plataforma experimental. Debido a que el sistema involucra múltiples entradas-salidas, dicho algoritmo es implementado por medio de una transformación no lineal. Esta transformación permite desacoplar las acciones de control de ambos convertidores con respecto a las variables de deslizamiento diseñadas, simplificando así su selección.

El controlador desarrollado se encuentra basado en el algoritmo *Super-Twisting*, el cual permite reducir el *chattering*

del sistema, típico de los algoritmos MD de primer orden, por medio de su acción de control continua. A su vez, este algoritmo permite mantener las características de robustez del control por modos deslizantes tradicional, así como su convergencia en tiempo finito.

III-A. Superficies de deslizamiento.

La acción de control correspondiente al módulo de pila de combustible se encuentra destinada a satisfacer el seguimiento de la referencia de corriente $i_{spc,r}$, provista por un control supervisor externo (ver Sec. III-C). Dicha corriente se encuentra directamente vinculada a la potencia suministrada por la pila de combustible y, por lo tanto, a la potencia media requerida por la carga. Este seguimiento de la corriente puede ser descrito mediante la teoría del control por modos deslizantes, a través de la variable de deslizamiento:

$$\sigma_1 = i_{spc} - i_{spc,r} \quad (8)$$

La regulación del bus común de tensión continua es realizada a partir del control del sistema de almacenamiento de energía, permitiendo responder a variaciones rápidas de la demanda de carga. Para dicho fin, se utiliza una variable de deslizamiento que involucra la corriente del banco de supercapacitores i_{sae} :

$$\sigma_2 = v_{dc} - v_{dc,r} + k_{sae}(i_{sae} - i_{sae,r}). \quad (9)$$

Al igual que con σ_1 , las referencias $v_{dc,r}$ y $i_{sae,r}$ son definidas por el control supervisor externo desarrollado en Sec. III-C. A su vez, la constante positiva k_{sae} debe ser diseñada para obtener la respuesta dinámica de lazo cerrado deseada de la tensión de bus v_{dc} .

De esta manera, el objetivo de control será entonces satisfecho diseñando una estrategia de control que lleve y mantenga a σ_1 y σ_2 , y sus primeras derivadas, a cero en tiempo finito. Es decir, un controlador que alcance y se mantenga sobre la superficie de deslizamiento $\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = 0$ y $\sigma_2 = \dot{\sigma}_2 = 0$.

III-B. Diseño de las acciones de control del sistema.

El diseño de las acciones de control u y v de ambos convertidores es realizado, en primera instancia, a través de una transformación no lineal. Esta transformación tiene el principal objetivo de desacoplar ambas acciones de control, con el objetivo de independizar y simplificar su posterior diseño.

De esta manera, la transformación empleada se obtiene del cálculo de la primera derivada temporal de las variables de deslizamiento σ_1 y σ_2 . Tomando ventaja de su estructura afín al control y su grado relativo igual a 1, $\dot{\sigma}_1$ y $\dot{\sigma}_2$ pueden escribirse como:

$$\dot{\sigma}_1 = \phi_1(\mathbf{x}) + \gamma_{11}(\mathbf{x}) \cdot u \quad (10)$$

$$\dot{\sigma}_2 = \phi_2(\mathbf{x}) + \gamma_{21}(\mathbf{x}) \cdot u + \gamma_{22}(\mathbf{x}) \cdot v \quad (11)$$

o su equivalente matricial:

$$\dot{\sigma} = \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_1 & \dot{\sigma}_2 \end{bmatrix}' = \Phi(\mathbf{x}) + \Gamma(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix}' \quad (12)$$

con:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \phi_1(\mathbf{x}) \\ \phi_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad y \quad \Gamma(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \gamma_{11}(\mathbf{x}) & 0 \\ \gamma_{21}(\mathbf{x}) & \gamma_{22}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

siendo $\mathbf{x} = [i_{pc}, v_f, i_{spc}, i_{sae}, v_{sc}, v_{dc}]$ el vector de estados del sistema. A partir de lo anterior, se define la transformación de las variables de control, u y v , como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{T}(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Por lo tanto, para desacoplar ambas acciones de control entre si de las variables de deslizamiento, se selecciona la matriz de transformación $\mathbf{T}(\mathbf{x})$ como:

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{L_{sae}i_{spc}}{i_{sae}L_{sae} - k_{sae}C_{dc}v_{dc}} & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

la cual existe y posee inversa si se cumple $L_{sae}i_{sae} - k_{sae}C_{dc}v_{dc} \neq 0$, que depende del diseño del controlador por medio de k_{sae} . De esta manera, las expresiones transformadas de $\dot{\sigma}_1$ y $\dot{\sigma}_2$ resultan:

$$\dot{\sigma}_1 = \phi_1(\mathbf{x}) + \xi_1(\mathbf{x})\omega_1 \quad (16)$$

$$\dot{\sigma}_2 = \phi_2(\mathbf{x}) + \xi_2(\mathbf{x})\omega_2 \quad (17)$$

con:

$$\xi_1(\mathbf{x}) = -\frac{v_{dc}}{L_{spc}} \quad y \quad \xi_2(\mathbf{x}) = \frac{i_{sae}}{C_{dc}} - \frac{k_{sae}v_{dc}}{L_{sae}}. \quad (18)$$

A partir de esta transformación, el control por modos deslizantes de segundo orden requiere el cálculo de las segundas derivadas temporales de σ_1 y σ_2 . Por lo tanto, de las ec. (16)-(17) se obtiene:

$$\ddot{\sigma}_1 = \varphi_1(\mathbf{x}, \omega_1, \omega_2) + \xi_1(\mathbf{x})\dot{\omega}_1 \quad (19)$$

$$\ddot{\sigma}_2 = \varphi_2(\mathbf{x}, \omega_1, \omega_2) + \xi_2(\mathbf{x})\dot{\omega}_2 \quad (20)$$

Asumiendo que existen constantes positivas $F_1, F_2, G_{m1}, G_{M1}, G_{m2}$ y G_{M2} que cumplen:

$$|\varphi_1(\mathbf{x}, \omega_1, \omega_2)| < F_1 \quad (21)$$

$$|\varphi_2(\mathbf{x}, \omega_1, \omega_2)| < F_2 \quad (22)$$

$$0 < G_{m1} < \xi_1(\mathbf{x}) < G_{M1} \quad (23)$$

$$0 < G_{m2} < \xi_2(\mathbf{x}) < G_{M2} \quad (24)$$

entonces, el algoritmo de control por MDSO Super-Twisting, que lleva y mantiene el sistema sobre la superficie de deslizamiento $\sigma_1 = \dot{\sigma}_1 = 0$ y $\sigma_2 = \dot{\sigma}_2 = 0$ en tiempo finito, viene dado por:

$$\omega_1 = -\alpha_1|\sigma_1|^{1/2}\text{sign}(\sigma_1) + \nu_1 \quad (25)$$

$$\dot{\nu}_1 = -\beta_1\text{sign}(\sigma_1) \quad (26)$$

$$\omega_2 = -\alpha_2|\sigma_2|^{1/2}\text{sign}(\sigma_2) + \nu_2 \quad (27)$$

$$\dot{\nu}_2 = -\beta_2\text{sign}(\sigma_2) \quad (28)$$

cuyos parámetros de control deben satisfacer:

$$\beta_1 > \frac{F_1}{G_{m1}} \quad (29)$$

$$\alpha_1 > \frac{2}{G_{m1}^2} \frac{(G_{m1}\beta_1 + F_1)^2}{(G_{m1}\beta_1 - F_1)} \quad (30)$$

$$\beta_2 > \frac{F_2}{G_{m2}} \quad (31)$$

$$\alpha_2 > \frac{2}{G_{m2}^2} \frac{(G_{m2}\beta_2 + F_2)^2}{(G_{m2}\beta_2 - F_2)} \quad (32)$$

para garantizar el alcance y la permanencia del controlador a la superficie de deslizamiento [10].

Como puede apreciarse, el diseño de los parámetros del controlador dependen exclusivamente de las cotas del sistema definidas en (21)-(24). Con el objetivo de garantizar la robustez del controlador, dichas constantes deben ser computadas teniendo en cuenta las posibles incertidumbres y perturbaciones del sistema. Como resultado de dichas cotas teóricas, los parámetros del controlador obtenidos suelen ser muy conservativos, requiriendo un ajuste empírico que permita obtener el menor esfuerzo de control posible, manteniendo las características de robustez deseadas.

III-C. Control supervisor del sistema de generación híbrida

Si bien el objetivo principal de este artículo no es el diseño de un control supervisor del sistema híbrido, el mismo es necesario para la implementación experimental del controlador propuesto. Por dicho motivo, en este trabajo se ha considerado una estrategia por separación de frecuencias para satisfacer la demanda de potencia requerida. La Fig. 4 muestra un esquema básico del control supervisor implementado.

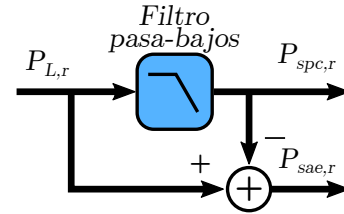


Figura 4. Diagrama básico del control supervisor por separación de frecuencias.

Como puede apreciarse, la referencia de potencia de la pila de combustible $P_{spc,r}$ se encuentra diseñada para suministrar las variaciones lentas de la potencia de carga P_L . Por lo tanto, las variaciones rápidas estarán a cargo del sistema de almacenamiento por medio de la referencia $P_{sae,r}$. A su vez, en la implementación del control supervisor se incorpora un término adicional de potencia, el cual permite regular la tensión v_{sc} de los SC, entorno a los 40V.

A partir de lo anterior, las referencias de corriente del SPC y del SAE, $i_{spc,r}$ y $i_{sae,r}$ pueden ser definidas como:

$$i_{spc,r} = \frac{P_{spc,r}}{v_f} \quad (33)$$

y

$$i_{sae,r} = \frac{P_{sae,r}}{v_{sc}} + z_{dc} \quad (34)$$

$$\text{con } z_{dc} = k_{dc} \int v_{dc} - v_{dc,r} dt \quad (35)$$

El término integral z_{dc} se encuentra destinado a compensar posibles errores de cómputo en las referencias de potencia o parámetros del sistema. Su acción de corrección debe ser diseñada por medio de la constante k_{dc} con el objetivo de poseer con una dinámica lenta en comparación con el controlador desarrollado en la Sec. III-B.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la presente sección, el rendimiento del controlador por MDSO Super-Twisting desarrollado es evaluado en la plataforma experimental descrita en Sec. II-A. En la Tabla I se presentan todos los parámetros de la plataforma y del controlador implementado.

Tabla I

PARÁMETROS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDA UTILIZADO EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.

Parámetros del sistema híbrido				Parámetros del controlador			
L_f	140 μ H	L_{spc}	190 μ H	β_1	0,35	β_2	2,37
C_f	2200 μ F	f_s	15kHz	α_1	1,44	α_2	2,17
L_{sae}	35 μ H	C_{dc}	5600 μ F	k_{sae}	0.05	k_{dc}	0,5

El sistema híbrido de energía se asume operando bajo una demanda de potencia P_L fuertemente variable. Dicho perfil de potencia fue generado asumiendo la operación de un vehículo eléctrico operando bajo un ciclo de conducción urbano definido por la norma EPA IM240 [18]. Adicionalmente, con el objetivo de evaluar la robustez del controlador implementado, en el segundo 120 se incluye una perturbación sinusoidal de 450W a 15Hz. La potencia de carga P_L emulada durante el ensayo puede apreciarse en la Fig 5.

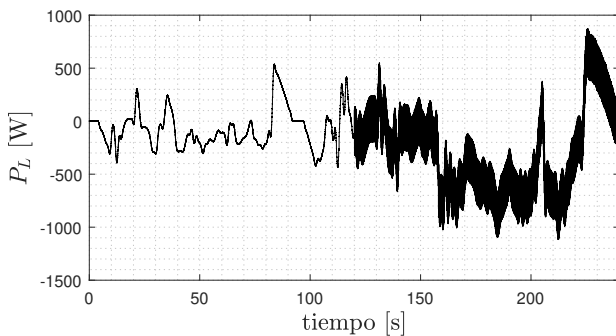


Figura 5. Perfil de potencia demandada por un vehículo eléctrico operado bajo el ciclo de conducción urbano EPA IM240.

La respuesta temporal del controlador Super-Twisting al seguimiento de potencia demandada es presentada en la Fig. 6. Como puede observarse, el sistema de control logra un seguimiento robusto de las referencias impuestas por el control

supervisor, aún frente a la fuerte variación y amplio rango de operación del sistema.

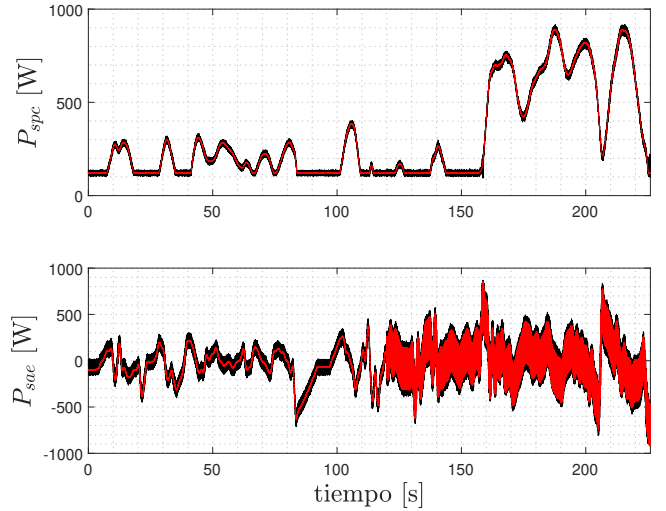


Figura 6. Respuesta temporal del controlador Super-Twisting a la demanda de potencia variable.

Como era de esperarse, la presencia de la perturbación exige al sistema de almacenamiento un mayor esfuerzo de control para poder rechazarla efectivamente. Esto permite que la pila de combustible prácticamente no se vea afectada por dicha perturbación, evitando así la degradación de su vida útil. Más aún, como puede apreciarse en la Fig 7, la tensión del bus común se mantiene perfectamente regulada aún frente a las importantes variaciones en la demanda de carga.

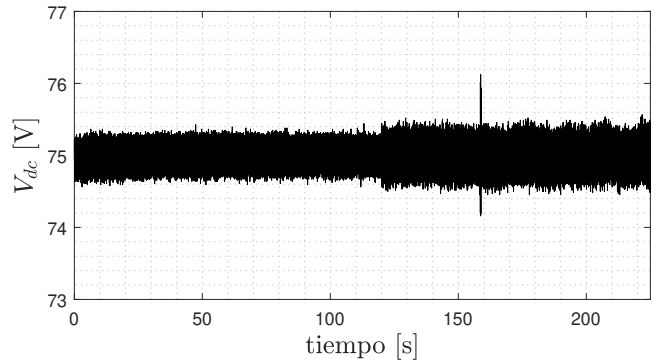


Figura 7. Evolución temporal de la tensión del bus común V_{dc}

El chattering resultante del sistema puede observarse con mayor detalle en la Fig. 8, donde se muestra la evolución temporal de las variables de deslizamiento σ_1 y σ_2 .

Por último, en la Fig. 9 se presentan las respuestas temporales de las tensiones de la PC y el banco de SC. Debe notarse como la tensión sobre el banco de supercapacitores v_{sc} nunca alcanza el valor constante de referencia de 40V. Esto se debe a que la dinámica de carga/descarga de los SC, impuestas por el control supervisor desarrollado en Sec. III-C, es mucho más lenta que el control de la tensión del bus. Esto, sumado a la

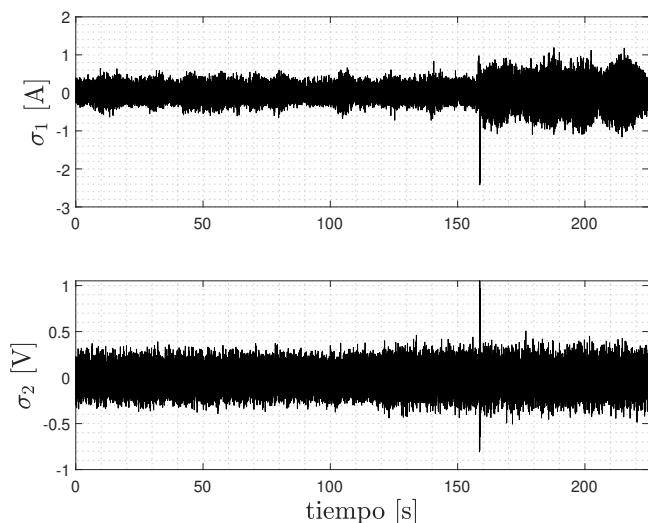


Figura 8. Respuesta temporal de las variables de deslizamiento σ_1 y σ_2

continua exigencia de la potencia de carga, hacen que dicha tensión sólo permanezca en las cercanías de la referencia.

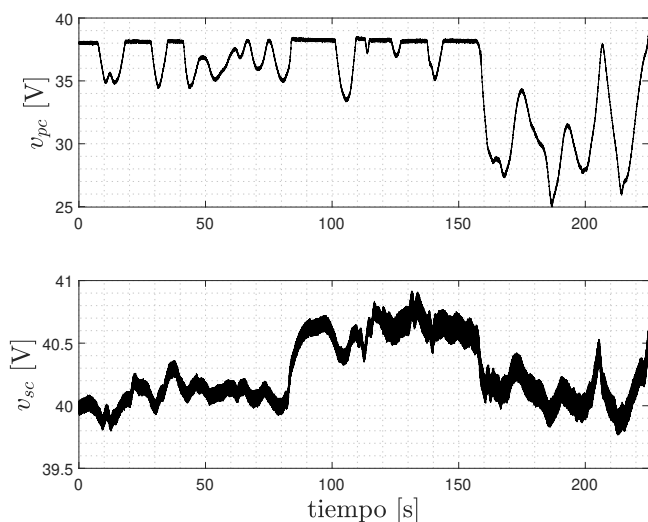


Figura 9. Variación de tensión sobre la pila de combustible v_{pc} y el banco de supercapacitores v_{sc} .

Por otro lado, si bien puede observarse que la Pila de Combustible trabaja en un amplio rango de operación, su respuesta dinámica se encuentra limitada por el control supervisor.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó experimentalmente un control por modos deslizantes de segundo orden para un sistema de generación híbrida compuesto por una pila de combustible y un banco de supercapacitores. El diseño del controlador propuesto se encuentra basado en el algoritmo *Super-Twisting*. Adicionalmente, se implementó una transformación no lineal que permitió simplificar e independizar el diseño de las variables de deslizamiento.

El controlador desarrollado fue evaluado en una plataforma experimental, que permitió emular la demanda de carga de un vehículo eléctrico trabajando en un ciclo de conducción urbano normalizado. Los resultados obtenidos mostraron un seguimiento robusto de las referencias impuestas por un control supervisor, aún frente a las importantes variaciones y perturbaciones de la potencia demandada. Más aún, la tensión del bus común se mantuvo perfectamente regulada con un nivel bajo de *chattering*.

ACKNOWLEDGMENT

Este trabajo fue realizado bajo el apoyo de la FI-UNLP, CONICET y Agencia I+D+i. El trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto nacional de España DOVELAR ref. RTI2018-096001-B-C32 (MCIU/AEI/FEDER, UE), la Agencia Nacional de Investigación de España a través del Sello de Excelencia María de Maeztu al IRI (MDM-2016-0656) y la Asociación Universitaria Iberoamericana de Postgrado (AUIP).

REFERENCIAS

- [1] IEA, "Global EV Outlook 2019," tech. rep., <http://www.iea.org>.
- [2] IEA, "World Energy Outlook 2019," tech. rep., <http://www.iea.org>.
- [3] H. S. Das, C. W. Tan, and A. Yatim, "Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies," *RSER*, vol. 76, pp. 268 – 291, 2017.
- [4] J. Lai and M. W. Ellis, "Fuel Cell Power Systems and Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, pp. 2166–2190, Nov 2017.
- [5] A. Kolli, A. Gaillarda, A. De Bernardinis, O. Bethoux, D. Hissela, and Z. Khatir, "A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 716–730, Nov. 2015.
- [6] B. Long, S. T. Lim, Z. F. Bai, J. H. Ryu, and K. T. Chong, "Energy management and control of electric vehicles, using hybrid power source in regenerative braking operation," *Energies*, vol. 7, no. 7, pp. 4300–4315, 2014.
- [7] M. Z. y. W. X. Li S., Yu X. Fridman L., ed., *Advances in Variable Structure Systems and Sliding Mode Control – Theory and Applications*. Springer International Publishing, 2018.
- [8] F. L., B. JP., and P. F., eds., *Recent trends in sliding mode control*. IET, 2016.
- [9] C. Kunusch, P. Puleston, and M. Mayosky, *Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells*. Springer London, 2012.
- [10] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, *Sliding Mode Control and Observation*. Springer New York, 2014.
- [11] Ballard Power System, Inc., "Nexa™ Power Module User's Manual," tech. rep., Ballard, <http://www.ballard.com>, 2003.
- [12] J. Talpone, P. Puleston, J. More, R. Griño, and M. Cendoya, "Experimental platform for development and evaluation of hybrid generation systems based on fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 13, pp. 10346 – 10353, 2012.
- [13] Maxwell Technologies, "Datashet 48V Modules. Document number: 1009365.13," tech. rep., Maxwell Technologies, <http://www.maxwell.com>, 2013.
- [14] NI, "cRIO-9047 Specifications," tech. rep., National Instruments Corporation, <http://www.ni.com>, 2018.
- [15] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, 2nd ed., 2003.
- [16] A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, and M. A. Ebrahim, "Novel energy management technique for hybrid electric vehicle via interconnection and damping assignment passivity based control," *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 116 – 128, 2018.
- [17] O. Kraa and H. Ghodbane and R.Saadi and M.Y. Ayad and M. Becherif and A. Aboubou and M. Bahri, "Energy Management of Fuel Cell/ Supercapacitor Hybrid Source Based on Linear and Sliding Mode Control," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 1258 – 1264, 2015.
- [18] U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov>.