

CONTROL DE SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE Y SUPERCAPACITORES

Anderson, Jorge L.; Moré, Jerónimo J.; Puleston, Pablo F.; Fornaro, Pedro

Instituto LEICI, UNLP-CONICET. Dept. Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 (B1900ASH), La Plata, Buenos Aires, Argentina
e-mail: anderson.jorgeluis@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan resultados parciales de la línea de investigación en pilas de combustible y sistemas híbridos de energía, desarrolladas en el instituto LEICI. La investigación se encuentra enfocada en optimizar el desempeño y maximizar el rendimiento energético del sistema, empleando técnicas de control avanzadas por modos deslizantes.

En los últimos años diversas fuentes de energía renovables y no convencionales han surgido como interesantes alternativas para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y solucionar la problemática energética mundial. En este contexto, los Sistemas Híbridos de Generación de Energía (SHGE) han despertado especial interés, con una continua evolución y aparición de nuevas tecnologías y desafíos.

Esta clase de sistemas combinan diversas fuentes de energías alternativas (ver Figura 1), con el objetivo de aprovechar las ventajas y solventar las desventajas de cada una de ellas. En particular, los sistemas de potencia basados en Pilas de Combustible (PC) con membrana de intercambio de protones presentan interesantes características [1], debido principalmente a su alta eficiencia, escalabilidad, polución virtualmente nula y sustentabilidad.

Sin embargo, desde el punto de vista eléctrico, las PCs presentan ciertos inconvenientes que hacen necesario su incorporación dentro de un adecuado sistema de acondicionamiento de potencia, conformando un Módulo de Pila de Combustible (MdPC). Más aún, con el objetivo de satisfacer la demanda de potencia de una carga variable, es imprescindible la conformación de un

El SAE posee como principales objetivos suministrar los picos de demanda de una determinada carga y regular la tensión de un bus común de tensión fija. De esta manera, el MEPC es usualmente diseñado para satisfacer la potencia media demandada por la carga, operando de forma segura y aumentando el desempeño de la PC.

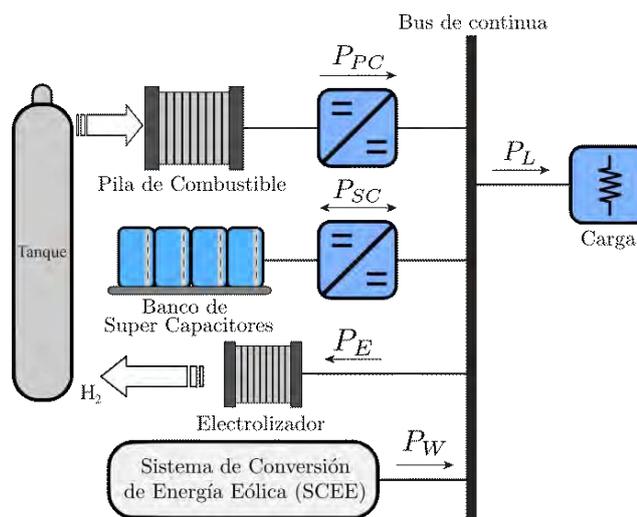


Figura 1. Esquema generalizado de un sistema de generación híbrida.



Figura 2. Sistema híbrido de energía basado en PCs. Colaboración con el IRI (CSIC-UPC), Barcelona, España.

SHGE, incorporando un Sistema de

En este contexto, los sistemas de control tienen un papel fundamental en sistemas de potencia que involucran Pilas de Combustible [2]. Debido principalmente a las importantes no linealidades de la PC y su sistema de acondicionamiento, las técnicas de control lineales suelen presentar bajo desempeño. Esta situación es incluso más deteriorada en sistemas con un amplio rango de operación. Adicionalmente, debido a las incertidumbres en el modelado del sistema y perturbaciones, es necesario el diseño de controladores robustos, que permitan asegurar el desempeño y la estabilidad del sistema en todo el rango de operación.

Teniendo en cuenta esto, en el presente trabajo se describe el análisis, diseño y la evaluación experimental de un controlador por Modos Deslizantes de Segundo Orden *Super-Twisting* (MDSO-ST) aplicado a un Módulo de Pila de Combustible basado en un Convertidor DC/DC Aislado de Puente Completo (CAPC). El controlador ST permite preservar ciertas características de robustez y convergencia en tiempo finito del control por Modos Deslizantes (MD) convencional, mientras logra una aminoración del *chattering* del sistema. Esta disminución del *chattering* reduce las pérdidas e incrementa la vida útil del MdPC. Además, el mismo posee un bajo costo computacional, el cual es sumamente importante para su implementación experimental.

SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA BASADO EN PC/SC

La topología estudiada en este trabajo se encuentra conformada por un Módulo de Pila de Combustible, el cual opera como núcleo de un Sistema Híbrido de Energía. Para la regulación de la tensión del bus, un SAE basado en un banco de Super Capacitores (SC) es considerado conectado al MdPC por medio de un bus DC (ver Figura 3). Esta topología es capaz de funcionar sobre un amplio rango de operación, permitiendo satisfacer variaciones abruptas de carga como las presentadas en un vehículo eléctrico.

El MdPC considerado se encuentra conformado por una PC comercial *Ballard*® de 10.5kW. La misma es conectada al bus común a través de un filtro en cascada de segundo orden y un convertidor DC/DC dedicado. De esta manera, el MdPC es diseñado para suministrar la potencia media requerida por la carga variable, mientras protege la integridad de la PC y prologa su vida útil. En lo que resta de la sección, las diferentes partes del Sistema Híbrido son descriptas.

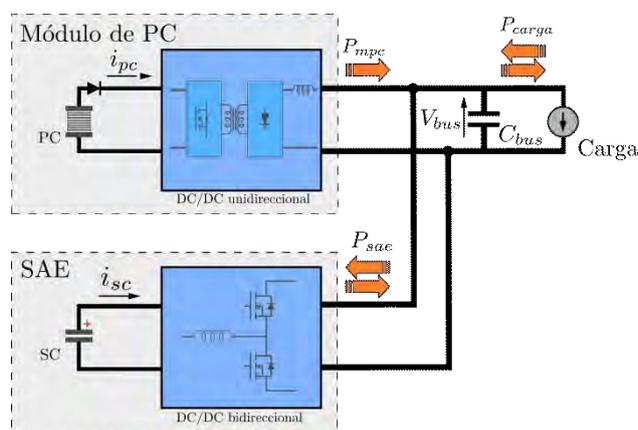


Figura 3. Esquema del Sistema híbrido compuesto por un MdPC y un SAE basados en SCs.

Pila de Combustible con Membrana de Intercambio de Protones

Una Pila de Combustible es un dispositivo electroquímico, el cual produce energía eléctrica a través de la oxidación del hidrógeno, con agua y calor como subproductos. Existen diversas PCs dependiendo del electrólito utilizado y la reacción química producida. Entre ellas, puede destacarse especialmente para aplicaciones móviles, la PC con Membrana de Intercambio de Protones, por sus propiedades de escalabilidad, baja temperatura y reducido peso y volumen.

Como fue mencionado, la tensión eléctrica suministrada por la PC presenta un amplio rango de variación y un comportamiento fuertemente no-lineal (ver Figura4). Dicho comportamiento es afectado principalmente por la condición

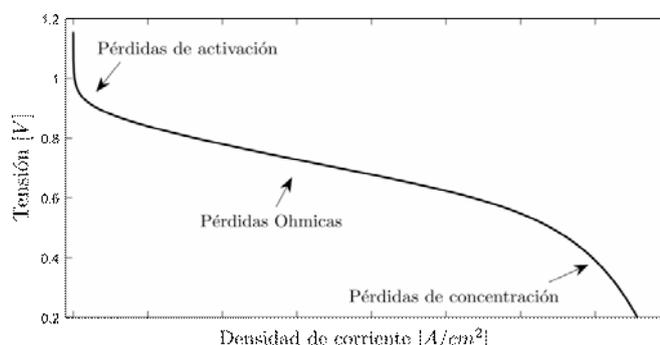


Figura4. Curva de polarización típica de una Celda de Combustible.

de potencia de carga, junto con la temperatura y presiones parciales.

Debido a la baja tensión de salida que otorga cada celda individualmente, las PCs se caracterizan por su arquitectura de múltiples celdas o 'pilas'. La tensión de una celda individual puede ser descrita a partir de sus tres principales pérdidas [3]:

$$V_{celda} = E - \Delta V_{act} + \Delta V_{ohm} + \Delta V_{conc}$$

siendo E la tensión teórica de la celda sin carga y ΔV_{act} , ΔV_{ohm} y ΔV_{conc} las pérdidas a baja, media y alta corriente, respectivamente.

Sistema de acondicionamiento del Módulo de Pila de Combustible

El MdPC bajo estudio se encuentra basado en un Convertidor DC/DC Aislado de Puente Completo con Modulación por Desplazamiento de Fase. En vista de la baja tensión a la salida de la PC, este convertidor es capaz de obtener una elevada ganancia de tensión, a través de un Transformador del Alta Frecuencia (TAF). El CAPC consta de una primera etapa inversora monofásica (ver Figura 5), conectada al primario del transformador, la cual genera una onda cuadrada de alta frecuencia de 3 niveles, producida por la diferencia de fase de las tensiones de cada columna [4]. El lado secundario del transformador es conectado a un rectificador vinculado al bus de tensión común por medio del inductor L_0 . Adicionalmente, con el objetivo de disminuir el rizado de la corriente suministrada por la PC, se añade un filtro pasa bajos de segundo orden a la entrada del convertidor.

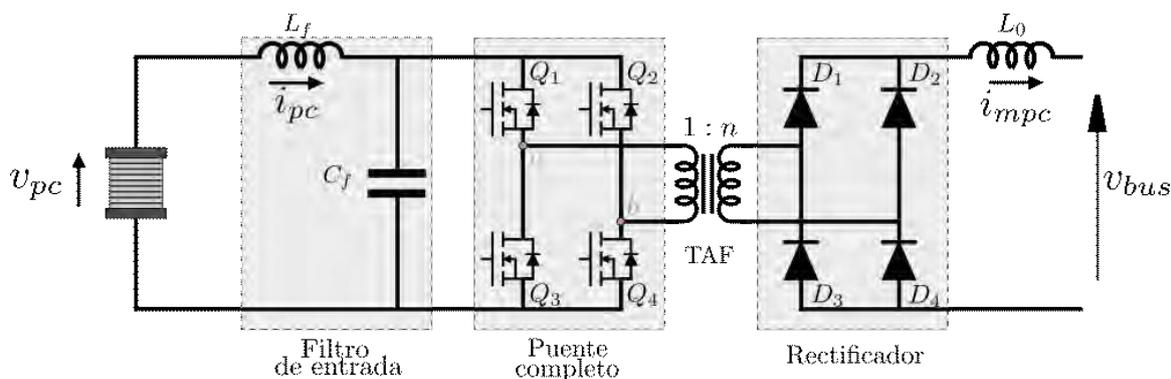


Figura 5. Esquema eléctrico del Módulo de Pila de Combustible estudiado

Sistema de Almacenamiento de Energía (SAE)

La incorporación del SAE como sistema auxiliar del MEPC permite una rápida respuesta del sistema frente a variaciones abruptas de la potencia de demanda, permitiendo garantizar la calidad de la potencia entregada a la carga. Así mismo, es el principal encargado de regular la tensión del bus común a un valor fijo.

En el sistema bajo estudio, el SAE se encuentra conformado por un banco de Super capacitores conectados al bus común de tensión fija a través de un convertidor del tipo elevador. La versatilidad de los SCs y su excelente performance en términos de eficiencia, vida útil y densidad de potencia, los convierte en elementos de sumo interés para su incorporación en sistemas híbridos de energía renovables, particularmente en vehículos eléctricos.

DISEÑO DEL CONTROLADOR POR MDSO SUPER-TWISTING

En esta sección se presenta el controlador MDSO-ST. El objetivo de control será satisfacer la demanda de potencia requerida al Módulo de PC, según el seguimiento de una potencia de referencia p_{mpcr} provista por un control supervisor externo. Este objetivo puede ser escrito en términos de la teoría de control por MD como:

$$\sigma(t) = i_{mpc}(t) \cdot V_{bus} - p_{mpcr}(t)$$

Siendo σ comúnmente llamada variable de deslizamiento.

El objetivo de control deseado será entonces satisfecho diseñando un controlador que lleve y mantenga σ y $\dot{\sigma}$ en $\sigma(t) = \dot{\sigma}(t) = 0$ (condición que define la variedad conocida como superficie de deslizamiento).

Una acción de control conocida como algoritmo MDSO *Super-Twisting* (ver Figura 6), que lleva tanto σ como $\dot{\sigma}$ a cero en tiempo finito es [5]:

$$\begin{aligned} u(t) &= -\lambda \cdot |\sigma(t)|^{1/2} \cdot \text{sign}(\sigma(t)) + \omega(t) \\ \dot{\omega} &= -\alpha \cdot \text{sign}(\sigma(t)). \end{aligned}$$

Debido a que la acción de control es continua, el algoritmo permite obtener una significativa reducción del *chattering* con respecto al control por MD convencional.

Los parámetros del controlador, α y λ , son sintonizados teniendo en cuenta las condiciones que garantizan el alcance del sistema a la superficie de modos deslizantes $\sigma(t) = \dot{\sigma}(t) = 0$. Esta sintonización se debe realizar teniendo en cuenta las incertidumbres propias del sistema, así como las posibles perturbaciones. Adicionalmente, la dinámica del sistema sobre la superficie de control, es decir la dinámica cero, debe ser analizada para garantizar la estabilidad del sistema sobre todo el rango de operación.

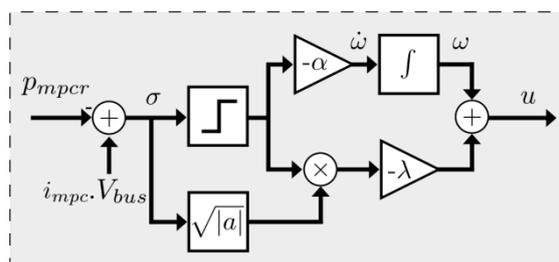


Figura 6. Diagrama del controlador MDSO *Super-Twisting*.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección, el desempeño del controlador MDSO-ST es evaluado por simulación, en un Módulo de Pila de Combustible de 10kW. La pila empleada para el ensayo es una PC comercial *Ballard® FCvelocity-9ssl*, con una potencia nominal de 10.5kW.

Con el fin de evaluar el desempeño del controlador diseñado, el ensayo es realizado considerando al sistema híbrido operando bajo una demanda de potencia fuertemente variable. El perfil de potencia de carga es generado teniendo en cuenta un ciclo de manejo urbano estandarizado EPA IM240 [6], para un auto eléctrico de 400 kg (ver Figura 7). A su vez, para evaluar la robustez del algoritmo, se han considerado variaciones en los parámetros del sistema del $\pm 20\%$ y variaciones en la tensión del bus de $\pm 5\%$.

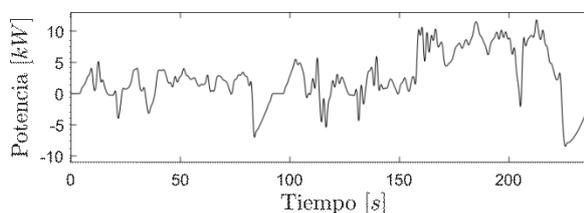


Figura 7. Perfil de potencia de demanda.

Con el objetivo de resguardar la vida útil de la PC, la referencia del MdPC es generada mediante una estrategia de separación de frecuencias, con una frecuencia de corte de 0.1 Hz . El seguimiento de la potencia de referencia del sistema se presenta en la Figura 8. Como se mencionó anteriormente, la diferencia entre la potencia de demanda y la potencia suministrada por el MEPC es naturalmente entregada por el SAE, mediante el control de la tensión del bus.

En dicha figura se observa como el controlador MDSO-ST presenta un robusto seguimiento de la referencia impuesta, a pesar de las importantes variaciones de la potencia de demanda y de la tensión de pila (ver Figura 9).

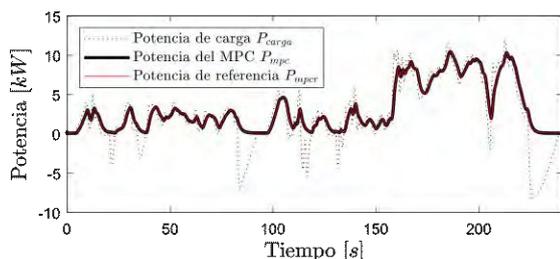


Figura 8. Seguimiento del perfil de potencia del controlador ST.

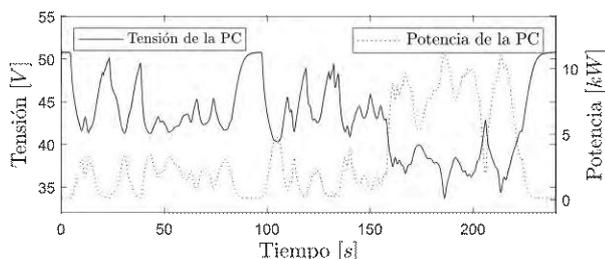


Figura 9. Tensión y potencia eléctrica suministrada por la PC.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, se detallan los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, considerando un sistema a escala. El sistema, representado en la Figura 10, fue implementado a partir de un Emulador de Pilas de combustible de 300W. El mismo es un dispositivo de laboratorio, el cual permite reproducir en condiciones de trabajo controladas, la curva característica eléctrica de una PC comercial. Además de la curva estática de la PC, el emulador permite también representar la dinámica eléctrica asociada al filtro de salida propio de la pila.

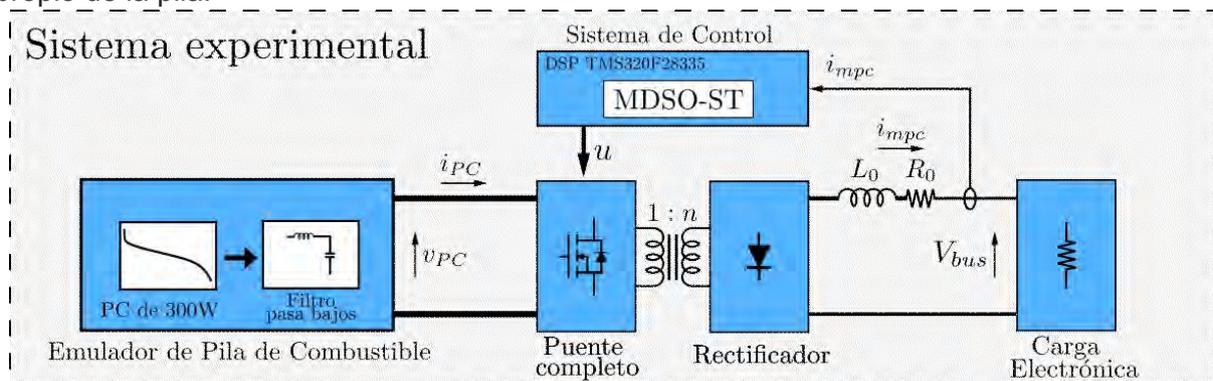


Figura 10. Esquema de implementación del ensayo experimental.

El controlador MDSO-ST fue implementado en un DSP TMS320F28335 de Texas Instruments©. El mismo es también el encargado de realizar la adquisición de datos de la corriente a controlar y generar las señales de control del convertidor CAPC.

El conjunto del SAE y bus DC es representado mediante una carga electrónica, encargada de llevar la tensión del bus a un valor fijo V_{bus} . En la Tabla 1 se resumen los parámetros utilizados en el sistema de laboratorio implementado, así como las ganancias sintonizadas del controlador *Super-Twisting*.

| Parámetros del CAPC | | Parámetros del Emulador | |
|---------------------|------------|-------------------------|--------|
| L_0 | 2 mH | V_{bus} | 80 V |
| R_0 | 100 mΩ | R_f | 100 mΩ |
| f_s | 20 kHz | L_f | 1 mH |
| n | 3.6 | C_f | 1.5 mF |
| v_{PC} | 60 ... 32V | | |

| Parámetros del ST | |
|-------------------|-------------|
| α | 16 |
| λ | 0.0053 |
| T_s | $50e^{-6}s$ |

Tabla 1. Parámetros utilizados en el ensayo experimental.

La Figura 11 muestra las curvas de tensión sobre el primario y secundario del Transformador de Alta Frecuencia, en conjunto con la tensión a la salida del rectificador a diodos del CAPC. A través de la relación de vueltas del transformador, el sistema puede ser diseñado para operar con un ciclo de trabajo del 50%, mejorando el desempeño general del convertidor.

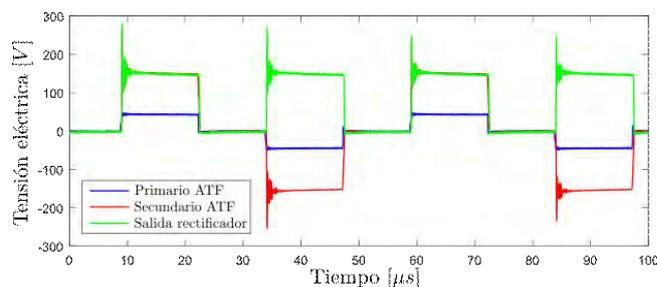


Figura 11. Tensiones eléctricas sobre el convertidor aislado.

Las pruebas de ensayo del MdPC consistieron en la generación de un cambio abrupto en la señal de referencia de potencia P_{mpc} , permitiendo observar la respuesta al escalón del controlador ST. Si bien el sistema no se encuentra diseñado para trabajar en dichas condiciones, este análisis evalúa el desempeño del control en condiciones de mayor exigencia. Con fines de comparación, el ensayo fue replicado con un control PI.

El salto en la referencia impuesta se realiza desde un punto de operación de baja potencia, correspondiente a 80W, a una potencia cercana a la nominal, de 280W. La respuesta temporal obtenida de la corriente I_{mpc} se presenta en la Figura 12. Debido a que se trabaja con una tensión V_{bus} fija, dicha respuesta es equivalente a la de la potencia suministrada al bus.

Para finalizar, en la Figura 13 se muestra el detalle del *chattering* resultante en el controlador ST, siendo de amplitud similar a las variaciones presentadas en el PI, pero levemente superior.

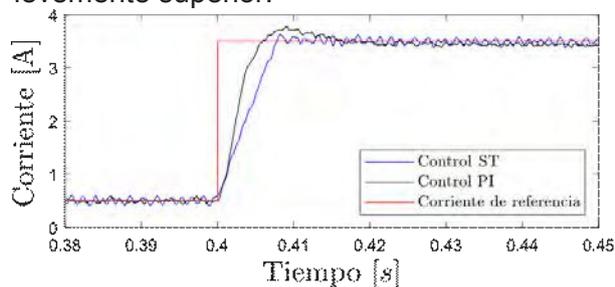


Figura 12. Respuesta al escalón del sistema para los controladores ST y PI.

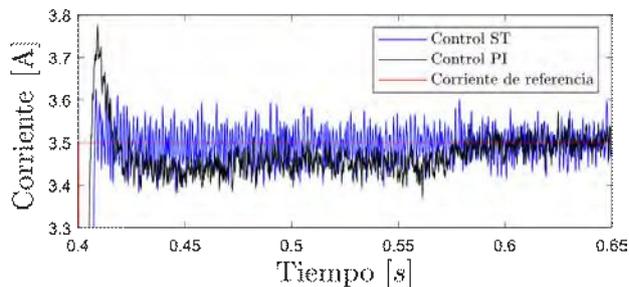


Figura 13. Detalle del chattering resultante.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el diseño, análisis de simulación y ensayo experimental de un control por Modos Deslizantes aplicado a un Módulo de Pila de Combustible. Dicho módulo se asume operando dentro de un Sistema Híbrido de Energía, con el objetivo de satisfacer la demanda de potencia de una carga variable.

Para reducir el *chattering* de la salida, típico en la mayoría de controles por MD, se desarrolló un controlador continuo MDSO Super-Twisting. El control propuesto consiguió un robusto seguimiento de la referencia de potencia del MdPC, a pesar de las importantes variaciones en la potencia demandada e incertidumbres y perturbaciones del sistema.

El sistema con el controlador desarrollado fue implementado en laboratorio. Las pruebas experimentales se realizaron a partir de un sistema a escala, compuesto por un Emulador de Pilas de Combustible de 300W desarrollado en el instituto. Los resultados mostraron como el algoritmo logró un robusto seguimiento de la referencia impuesta, con un *chattering* de amplitud similar a las variaciones presentadas por el algoritmo lineal PI.

Para finalizar, puede destacarse que el controlador Super-Twisting diseñado presenta un bajo costo computacional, lo que permitió su sencilla implementación experimental. Adicionalmente, el MdPC propuesto presenta gran versatilidad, pudiendo ser utilizado en Sistemas Híbridos compuestos por diversas fuentes de energía alternativas y dispositivos no convencionales.

REFERENCIAS

- [1] Y. Wang, K. Chen, J. Mishler, S. Chan Cho, and X. Cordobes Adroher, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research," *Applied Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 981–1007, apr 2011.
- [2] C. Kunusch, P. Puleston, and M. Mayosky, *Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells*, S.-V. London, Ed. Springer London, 2012.
- [3] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed. Wiley, 2003.
- [4] R. Xinbo, *Soft-Switching PWM Full-Bridge Converters: Topologies, Control and Design*. Wiley, 2014.

[5] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, '**Sliding Mode Control and Observation**'. Springer New York, 2014.

[6] <https://www.epa.gov>.