

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE EVALUACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE

Tavella, Tomás; Anderson, Jorge L.; Puleston, Paul F.

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

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo consiste en el estudio, diseño, construcción y validación experimental de una plataforma para la evaluación de Sistemas Híbridos de Generación de Energía (SHGE) a partir de pilas de combustible de hidrógeno. La herramienta desarrollada permitirá el diseño y propuesta de nuevas estrategias de control que optimicen la extracción de energía de los sistemas híbridos.

En este contexto, el sistema propuesto se encuentra conformado principalmente por un convertidor electrónico de potencia de CC-CC conmutado y aislado, con topología tipo Puente Completo con modulación por Desplazamiento de Fase (PS-FBC por sus siglas en inglés); monitoreado mediante la medición de sus estados de tensión y corriente eléctrica, y controlado por una excitación de tipo PWM provista por un DSC (*Digital Signal Controller*) de alto rendimiento. La topología de convertidor bajo estudio permite adaptar la tensión variable que entrega cada pila de combustible, típicamente de bajo valor, a la tensión de salida fija de un bus común de 75V conectado al SHGE [1].

De esta manera, a lo largo del trabajo se realiza el análisis de la plataforma desarrollada a partir de la descripción de los bloques fundamentales que la conforman. Una vez realizado el estudio y diseño de la plataforma propuesta, el sistema es desarrollado mediante la herramienta EDA KiCad de generación de circuitos eléctricos y enviada para su fabricación (ver Figura 1). Finalizado el proceso de construcción del módulo propuesto, se llevaron a cabo diferentes ensayos experimentales para la validación de su correcto funcionamiento.

2. DISEÑO DE LA PLATAFORMA

En la Figura 2 se muestra un diagrama detallado de la plataforma propuesta, donde se presentan todos los distintos bloques funcionales,

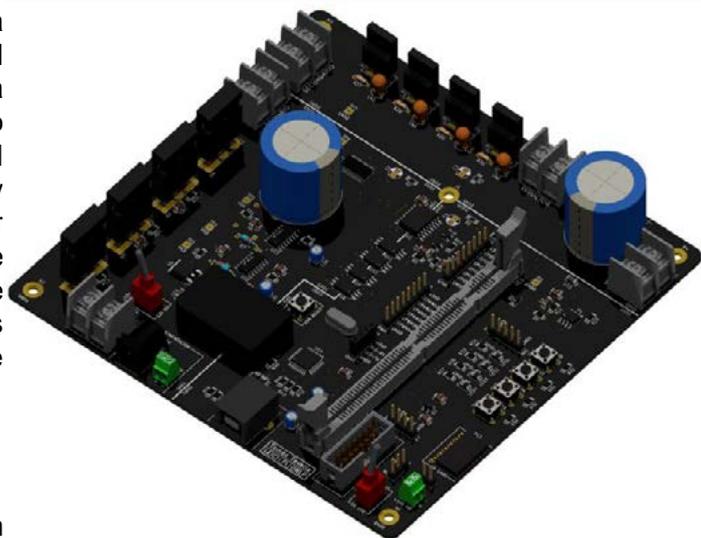


Figura 1: Plataforma experimental para la evaluación de sistemas híbridos de generación.

incluyendo los bloques auxiliares necesarios para la adquisición y control de las variables del sistema.

Cada uno de estos seis bloques cumplen una función específica que se resume a continuación:

- **Convertidor de potencia:** Este bloque corresponde al núcleo de la plataforma. Es el sistema de potencia encargado de acondicionar los niveles eléctricos de la pila de combustible, mientras provee una aislación galvánica con el bus común de tensión fija.
- **Sistema de control:** En este bloque se realiza el procesamiento de las variables eléctricas medidas y se generan las señales de control para el *Convertidor de potencia* [2].
- **Circuito Driver:** Este circuito se encarga de entregar los niveles de corriente y tensión necesarios para disparar los transistores de potencia y conmutarlos correctamente. Es comandado por el *Sistema de control*.
- **Sistema de medición:** Este bloque incorpora todos los sistemas de instrumentación necesarios para realizar las mediciones de los parámetros eléctricos de interés de la plataforma. El mismo incluye también las etapas de acondicionamiento de las señales medidas para su posterior procesamiento.
- **Etapas de aislación de señal:** Esta etapa se encarga de generar una barrera de aislación eléctrica entre los componentes de potencia y las señales provenientes del *Sistema de control*.
- **Circuito de alimentación:** Es el bloque que se encarga de proveer las corrientes y tensiones necesarias para los subsistemas del *Convertidor de potencia*, *Sistema de Control* y etapas auxiliares, a partir de una alimentación externa.

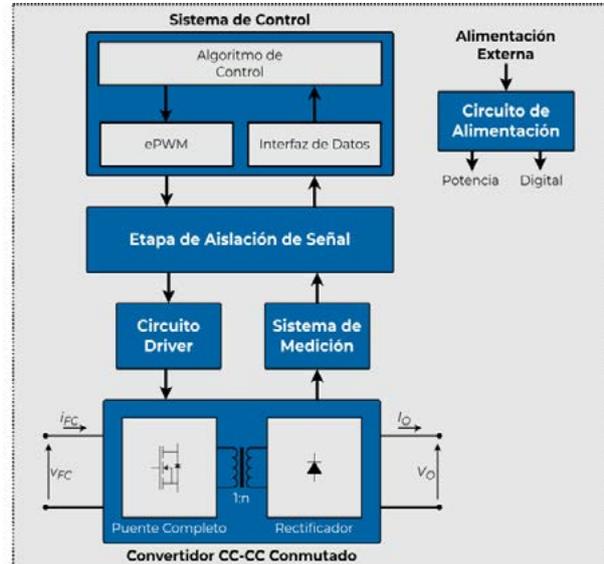


Figura 2: Diagrama de bloques de la plataforma experimental.

A continuación se describen los bloques principales del sistema experimental desarrollado. A lo largo del trabajo se realizó una exhaustiva selección y dimensionamiento de todos los componentes que forman parte de estos subsistemas, hasta obtener un esquemático circuital detallado de la plataforma experimental de evaluación.

Convertidor CC/CC de potencia aislado

La plataforma experimental es diseñada para la evaluación de un módulo de pilas de combustible de 300W de potencia nominal, entregando 36V a 8.3A de corriente. La tensión de salida de la FC varía desde 65V a circuito abierto hasta 30V para la máxima corriente de 9.5A [3]. Bajo estas condiciones de operación, asumiendo un bus de tensión fija de 75V, la corriente máxima de salida a

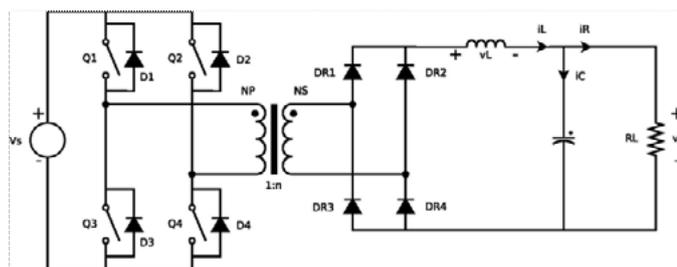


Figura 3: Convertidor PS-FBC aislado.

potencia nominal resulta de 4A.

Ante estos requerimientos, los convertidores CC/CC aislados presentan características interesantes para ser utilizados en módulos de generación basados en pilas de combustible. En primer lugar, proporcionan una alta ganancia de tensión mediante la diferencia de tensión entre los devanados del transformador que lo conforman [1]. Además, dentro de los diferentes tipos disponibles, el Convertidor de Puente Completo con modulación por Desplazamiento de Fase, o PS-FBC (ver Figura 3), logra reducir el estrés en los transistores de conmutación, lo que permite su uso en sistemas de baja y media potencia, y es adecuado para la aplicación de técnicas de conmutación a tensión nula, lo que reduce significativamente las pérdidas del sistema [4].

Sistema de control y procesamiento de las variables medidas

El *Sistema de control* de la plataforma propuesta fue desarrollado por medio del dispositivo DSC TMS320F28335 de Texas Instruments. Este controlador permite generar todas las señales PWM de disparo para las llaves de conmutación, con un módulo dedicado para la generación de la modulación por desplazamiento de fase utilizada por el *Convertidor de potencia*. También incorpora diferentes periféricos como convertidores ADC de 12 bits y una variedad de protocolos de comunicación para la medición y posterior procesamiento de las variables del sistema.

A su vez, la programación del DSC es realizada por medio de una interfaz JTAG, lo que permite depurar de forma sencilla el firmware desarrollado para el dispositivo. Esta herramienta es de vital importancia para la etapa inicial de desarrollo.



Figura 4: Controlador TMS320F28335 de Texas Instruments.

Circuito Driver de excitación de MOSFET

Para excitar los transistores MOSFET utilizados en el convertidor, y así poder encenderlos, es necesario mantener una tensión V_{GS} entre los terminales *Gate* y *Source* mayor a una tensión umbral dependiente del dispositivo empleado. En esta plataforma, se emplearon transistores MOSFET IRFP150, que poseen una tensión umbral de 4V. De esta manera, es necesario diseñar un circuito que sea capaz de proveer estos pulsos de tensión al *gate* de cada transistor (cuatro en total para el convertidor empleado), entregando también corrientes suficientemente rápidas para la carga y descarga de sus capacitancias de *gate* (llamadas corrientes de *source* y *sink*, respectivamente). Dicho circuito suele ser llamado *Circuito driver* o *Circuito de excitación* y debe existir uno para cada uno de los cuatro transistores del puente.

En el presente trabajo, se seleccionó el *driver* 2ED21834-S06J, de Infineon Technologies, de doble canal para circuitos medios puentes con transistores de tipo MOSFET e IGBT, con diodo y resistencia de bootstrap incluidos además de una funcionalidad de dead-time integrada.

Sistema de medición de las variables eléctricas

Para realizar un adecuado control de la plataforma, se debe tomar información de cuatro de las variables eléctricas del sistema: la tensión y corriente de la pila de combustible (V_{FC} e I_{FC}) y la tensión y corriente de salida (V_O e I_O), como se detallan en la Figura 2.

El esquema de medición utilizada (Figura 5) comienza con la adquisición de los parámetros de interés provenientes del convertidor, tarea llevada a cabo por los sensores de tensión y corriente que conforman la *etapa de sensado*. Luego la *etapa de acondicionamiento* se encarga de convertir los datos obtenidos por los sensores a unidades de tensión y corriente reales según corresponda. Finalmente, necesitamos una forma de enviar estos datos desde el sistema de medición hasta el *Sistema de Control*, función que es llevada a cabo por el último bloque de la figura, la *etapa de transmisión*.

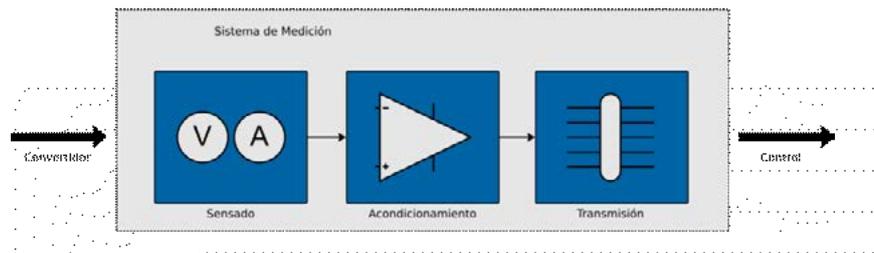


Figura 5: Diagrama de bloques del proceso de medida.

Para la medición de las variables eléctricas de entrada, V_{FC} e I_{FC} , y la tensión de salida, V_O , se utilizó el integrado de monitoreo LM5056A de Texas Instruments. Este dispositivo permite tomar la medida simultánea de las tres variables y puede ser utilizado en el rango de operación establecido. Los parámetros analógicos de tensión y corriente medidos por el LM5056A son muestreados y convertidos a información digital mediante un conversor analógico-digital interno de 12 bits de resolución con frecuencia de muestreo f_m de 1kHz. Una vez convertidos, se transmiten al controlador mediante una interfaz I2C que provee el mismo integrado.

Por el otro lado, la corriente de salida, I_O , es medida de forma independiente por un sensor de efecto Hall con mayor ancho de banda. El sensor utilizado es el TMCS1100A4 de Texas Instruments, un sensor de efecto Hall de medición tanto unidireccional como bidireccional (corrientes positivas y negativas) de alta precisión y aislamiento galvánico intrínseco al método de medida.

Etapa de Aislación eléctrica de las señales del sistema

Todas las señales de medida y control del sistema de potencia fueron aisladas galvánicamente con el objetivo de proteger a la unidad de control de la plataforma desarrollada. Entre estas señales aisladas se encuentran principalmente las salidas PWM del controlador para el disparo de las llaves de potencia y todas las líneas de comunicación I2C para la transmisión de las variables medidas.

La aislación de las señales de disparo fue realizada por medio de dispositivos optoacopladores ACPL-P480 de Broadcom. Ya que cada optoacoplador es de canal único, se utilizaron 4 módulos, uno por cada llave de conmutación. Por otro lado, las señales de comunicación fueron aisladas por medio del dispositivo dedicado ISO7242C, de Texas Instruments.

Circuito de Alimentación aislado para las etapas de potencia y digital

Para finalizar, se diseñó el circuito de alimentación, que se encarga de proveer las tensiones y corrientes necesarias para el funcionamiento de todos los circuitos auxiliares de la plataforma. Al estar la plataforma dividida en circuitos de potencia y circuitos de señal o digitales, ambos aislados galvánicamente entre sí, es necesario implementar fuentes de alimentación separadas para cada una de estos módulos. Esto permite proteger eléctricamente las dos etapas, y evitar que las posibles fallas se propaguen a lo largo de todo el sistema.

La aislación entre ambos módulos se implementó por medio del convertidor de tensión THB 3-1211 de Traco Power que permite separar galvánicamente las etapas de potencia y digitales del sistema desarrollado. A partir de esta tensión aislada, fueron posteriormente

generadas todas las tensiones de los circuitos necesarias para el funcionamiento de cada sistema individual.

3. ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la realización de todos los ensayos experimentales, se utilizó como instrumento de medición un osciloscopio digital doble canal Tektronix TBS1102B de 100 MHz de ancho de banda y 2 GS/s, tal como el que se observa en la Figura 6. Para suministrar la tensión y corriente de entrada al convertidor, se utilizó una fuente de laboratorio de corriente continua HP 6010A, visible en la esquina superior derecha de la imagen, con capacidad de hasta 200 V, 17 A y 1000 W. Finalmente, para simular las condiciones de carga a la salida de la plataforma, se utilizó la carga electrónica variable ITECH I8514B+, presente en la figura debajo de la fuente de laboratorio.



Figura 6: Setup utilizado para la realización de los ensayos experimentales.

Las pruebas realizadas consistieron en dos ensayos independientes. El primer ensayo corresponde a la evaluación de la plataforma sin conexión de carga a la salida. Luego, en el segundo ensayo, se incorpora la carga electrónica para simular condiciones de consumo a la salida del sistema.

Ensayo sin carga

Como primer ensayo, se realizaron mediciones de la tensión en el bobinado primario del transformador, así como las tensiones en los puntos medios de cada columna del puente de transistores (ver Figura 3). Los terminales de entrada correspondientes a la pila de combustible fueron conectados a la fuente de laboratorio HP6010A, entregando una tensión continua de 30V. Sin embargo, como este primer ensayo fue realizado sin ninguna carga a la salida, los terminales correspondientes al secundario del transformador fueron desconectados, dejando el sistema a circuito abierto. De esta manera, no existirá circulación de corriente sobre ninguna parte del sistema, protegiendo al mismo en caso de una posible falla.

Este ensayo inicial fue realizado suponiendo un desfase entre ambas señales de columna de 90°. En la figura 7 se observan las señales de tensión del bobinado primario y de ambos puntos medios de las columnas del puente de transistores.

Como puede apreciarse, las señales de tensión de los puntos medios (figura inferior) consisten en ondas cuadradas de 20kHz de frecuencia fundamental y ciclo de trabajo fijo de 50%. La tensión del primario del transformador del convertidor aislado resulta entonces de la resta de las dos señales de cada medio puente.

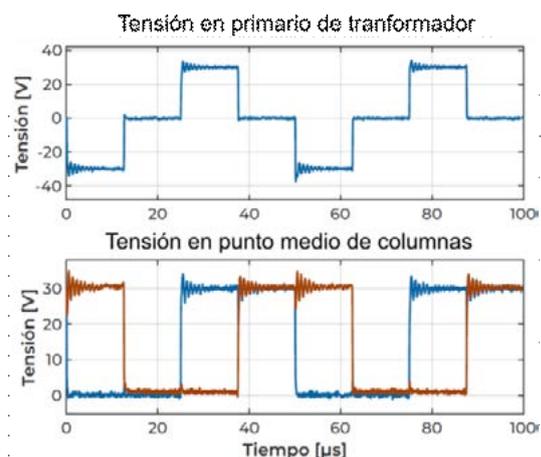


Figura 7: Formas de ondas de tensión en ensayo sin carga.

Ensayo con carga

Una vez realizado el ensayo sin carga, y verificado el funcionamiento sin fallas del puente de transistores, se puede proceder a la siguiente prueba. A diferencia del caso anterior, se va a ensayar el convertidor CC-CC completo, conectando el transformador y la salida del filtro LC a la carga electrónica ITECH I8514B+ (ver Figura 3).

Con el objetivo de evaluar la segunda etapa del convertidor, ahora se realizó la medida de la tensión sobre el secundario del transformador, así como la tensión y corriente a la salida del puente de diodos. Al igual que en el ensayo anterior, la tensión a la entrada del sistema V_{FC} , provista por la fuente de potencia, es de 30V.

En la Figura 8 se observan las mediciones adquiridas para un desfase de 90° , con una resistencia de carga R_L de 100Ω . Como puede apreciarse, sobre el secundario del transformador se obtienen picos de tensión del orden de los 100V, debido a la relación de vueltas del transformador. Seguidamente, el puente de diodos logra rectificar la señal proveniente del transformador, obteniendo un valor medio de tensión de aproximadamente 50V. Dicha forma de onda rectificada de tensión genera sobre el inductor de salida formas de corrientes triangulares con una corriente media de aproximadamente 0.5A.

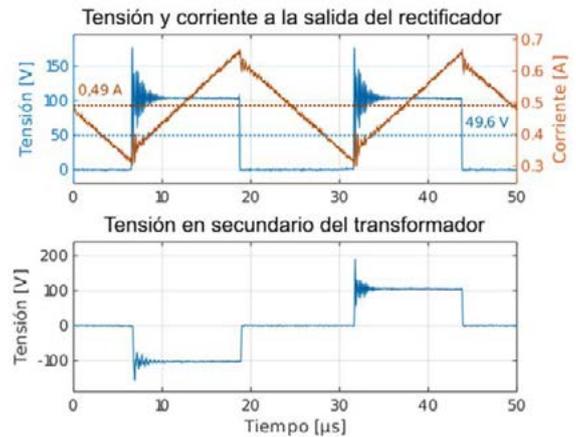


Figura 8: Formas de ondas de tensión en ensayo con carga.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo consistió en el diseño y desarrollo de una plataforma electrónica integrada, con el propósito de evaluar sistemas híbridos basados en pilas de combustible. A lo largo del artículo se describen los principales componentes que conforman el módulo desarrollado. Posteriormente, se realizan diversos ensayos experimentales para validar el correcto comportamiento de la plataforma propuesta.

De esta manera, la herramienta desarrollada permitirá el diseño y la evaluación experimental de nuevas estrategias de control que optimicen la extracción de energía en sistemas híbridos.

REFERENCIAS

- [1] J.L. Anderson, J.J. Moré, P.F. Puleston, **Design and Stability Analysis of a Super-Twisting Controller for a PS-FBC based Fuel Cell Module**. Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems, Wiley, 2019.
- [2] J.L. Anderson, J.J. Moré y P.F. Puleston. **Stability criteria for input filter design in converters with CPL: Applications in sliding mode controlled power systems**. Energies 2019.
- [3] C. Kunusch, P. Puleston, and M. Mayosky, **Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells**, S.-V. London, Ed. Springer London, 2012.
- [4] R. Xinbo, **Soft-Switching PWM Full-Bridge Converters: Topologies, Control and Design**. Wiley, 2014.