

Jornadas de Automática

Diseño de banco de ensayos para módulos de pilas PEM

Calderón-Valdez, S.N.^{a*}, De la Cruz-Rodríguez, C.^a

^a Unidad de Simulación, Control y Usos Finales, Centro Nacional del Hidrógeno, Prolongación Fernando el Santo, s/n, 13500 Puertollano, España.

To cite this article: Calderón-Valdez, S.N., De la Cruz-Rodríguez, C. Test bench design for PEM fuel cell modules. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10824>

Resumen

Las pilas de combustible son una tecnología de generación y cogeneración de energía limpia y de bajas emisiones utilizadas en el transporte, residencial y otros ámbitos. Las aplicaciones de las pilas de combustible en los distintos sectores han aumentado la demanda de bancos de ensayos que se adapten a diferentes tipos y modelos de pilas que el mercado ofrece. Los bancos de ensayos permiten comprobar la funcionalidad y determinar el rendimiento, la fiabilidad y la eficiencia de la pila. Este artículo propone el diseño de un banco de ensayos para pilas de combustible de membrana polimérica (PEM) de 100 kW a 1 MW, se describe la arquitectura del banco de ensayos dividido en 4 subsistemas: sistema de la línea de suministro de hidrógeno, sistema de refrigeración, sistema de electrónica de potencia y sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). Por último, se describen servicios auxiliares para tener en cuenta durante el montaje y funcionamiento de la pila.

Palabras clave: Supervisión y pruebas, Sistemas de potencia, Controladores lógicos programables, Sistemas de instrumentación y control, Supervisión y evaluación del rendimiento.

Test bench design for PEM fuel cell modules

Abstract

Fuel cells are a technology for the generation and co-generation of clean and low emission energy used in transport, residential and other environments. The applications of fuel cells in different sectors have raised the demand for test benches that can be adapted to the different types and models of cells available on the market. Test benches are used to test the functionality and determine the performance, reliability, and efficiency of the fuel cell. This article proposes the design of a test bench for polymer membrane fuel cells (PEM) from 100 kW to 1 MW, describes the architecture of the test bench divided into 4 subsystems: hydrogen supply line system, cooling system, power electronics system and monitoring, control, and data acquisition (SCADA) system. Finally, auxiliary services to be considered during the assembly and operation of the fuel cell are described.

Keywords: Supervision and testing, Power systems, Programmable logic controllers, Instrumentation and control systems, Monitoring and performance assessment.

1. Introducción

Las pilas de combustible son dispositivos que, a partir de la reacción electroquímica de unir hidrógeno y oxígeno obtienen energía eléctrica, así como energía térmica y agua. Se utilizan para reemplazar las tecnologías de combustibles fósiles, puesto que las emisiones que producen son nulas.

Entre los diferentes tipos de pilas de combustible, la pila de combustible PEM es la tecnología más madura a nivel de desarrollo comercial, y se utiliza especialmente para aplicaciones de transporte y cogeneración estacionaria a nivel residencial, industrial, comercial y eléctrico. Su alta

eficiencia, funcionamiento a baja temperatura, alta densidad de potencia, rápida puesta en marcha, modularidad y robustez del sistema la convierten en una de las tecnologías con alto nivel de integración en diferentes sistemas de generación y cogeneración de energía. (W.Q. Tao, C.H. Min, X.L. Liu, Y.L. He, B.H. Yin, W. Jiang, 2006).

Si bien, en la actualidad la implementación de las pilas de combustibles aún es poco viable por el alto costo y la baja disponibilidad del hidrógeno como combustible, existe una alta demanda en el desarrollo de aplicaciones en automoción, residencial, industrial, telecomunicaciones, entre otros. Por lo tanto, es necesario diseñar un banco de ensayos en el que sea

posible probar diferentes escenarios de manera eficaz realizando pruebas que determinen su funcionamiento, rendimiento óptimo, su fiabilidad y su eficiencia.

2. Banco de ensayos de pilas de combustible

Existen diversidad de bancos de ensayos para la experimentación de prototipos de pilas de combustible tipo PEM a nivel stack. Los bancos diseñados alcanzan bajas potencias, por ejemplo, el diseñado y desarrollado por el Instituto de Carboquímica (ICB) que permite ensayar pilas de hasta 50 kW (De Aragón, 2024) y el banco de ensayos modular que LIFTEC (Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión) está desarrollando para pilas de combustible de baja temperatura de potencia máxima de 50 kW (PTI - TransEner + Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2024).

También, hay bancos de ensayos diseñados para módulos y/o sistemas de pilas de combustible tipo PEM. Los módulos de la pila incluyen el stack con todos los elementos del BoP (Balance of Plant) en el diseño de la pila, por lo que internamente tiene su propio sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). La pila se bosqueja como una caja negra que necesita las conexiones apropiadas para su funcionamiento, es decir, entrada de combustible, sistema de refrigeración, equipamiento e instrumentación. Los bancos de ensayos que se proponen para el testeo de módulos de pilas de combustible PEM son de bajas potencias, como, por ejemplo, el de (Zambrano Hernández, 2020) que trabajan con un módulo Ballard Nexa de 1.2 kW.

El Centro Nacional de Experimentación de Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combustible (CNH2) es un centro de investigación de ámbito nacional creado en 2007, orientado a impulsar la investigación científica y tecnológica de las tecnologías de hidrógeno y pilas de combustible (Centro Nacional del Hidrógeno, 2024), en donde, desde hace 5 años se diseñan bancos de pruebas para ensayar diferentes modelos y tamaño de módulos de pilas de combustible PEM de potencias desde 100 kW hasta 1MW.

La experiencia adquirida del CNH2 en los distintos proyectos de índole nacional y europeo le proporcionan el know-how para transferir el conocimiento y la experiencia en el diseño y uso del equipamiento necesario. Además, se diseñan cumpliendo las normas de seguridad y directivas ATEX necesarias.

3. Arquitectura del banco de ensayos

Una pila de combustible presenta interacciones físicas, químicas, térmicas y eléctricas que se contemplan en el diseño del banco de ensayos. En general, el banco de ensayos debe alimentar la pila con la presión requerida de hidrógeno, suministrar el aire en las condiciones adecuadas, contar con un sistema de refrigeración para la disipar el calor generado por la pila e implementar la distribución eléctrica y el sistema de monitorización y control. Además, debe de disponer del espacio físico, equipamiento e instrumentación para ensayar con módulos de pilas de combustible de 100 kW a 1MW.

La arquitectura del banco de ensayos propuesto se divide en 4 subsistemas que trabajando en conjunto permiten realizar las pruebas para corroborar el funcionamiento de la pila de combustible de forma segura y factible, monitorizando parámetros de presión, temperatura, flujo, voltaje y corriente, entre otros.

La Figura 1 muestra el diagrama general de la arquitectura del banco de ensayos diseñado por el CNH2 y la Figura 2 se muestra un ejemplo de la instalación de un banco de ensayos realizada en el centro.

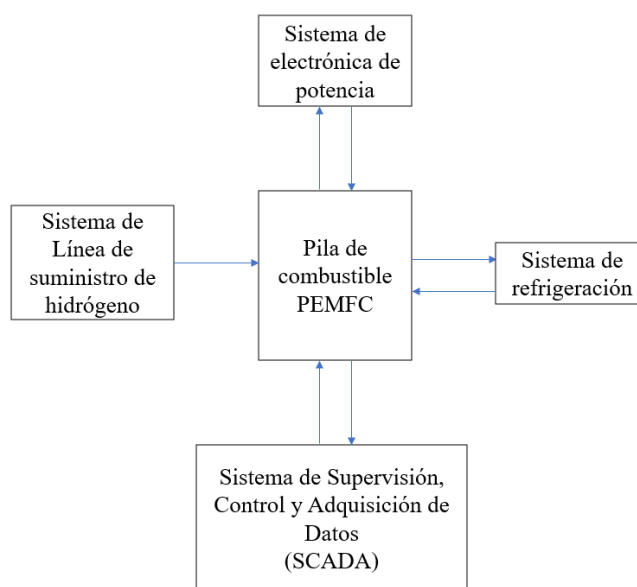


Figura 1: Esquema de la arquitectura de un banco de pruebas.



Figura 2: Banco de ensayos de una pila de combustible PEM en el CNH2.

3.1. Sistema de línea de suministro de hidrógeno (H₂)

Las pilas de combustible tienen una entrada de combustible que será alimentada con H₂. El banco de ensayos tiene que implementar una línea de suministro de hidrógeno que suministre y controle la presión de H₂ hacia la pila.

El CNH2 produce hidrógeno a partir de la instalación de un huerto solar fotovoltaico de 100 kW. Parte de la energía eléctrica obtenida es utilizada para el funcionamiento del electrolizador de alcanina de 60 kW.

El H₂ producido se comprime y se almacena en tanques de 10 bar, 200 bar y 450 bar. Además, tiene un semirremolque

portátil a 200 bar con almacenamiento adicional. La capacidad total del centro es de 300 kg H₂.

En la Figura 3 se muestran el Parque de almacenamiento del CNH2 y el semirremolque portátil.



Figura 3(a) Parque de almacenamiento Figura 3(b) Semirremolque portátil

Figura 3: Sistema de línea de suministro de H₂ del CNH2.

3.2. Sistema de refrigeración

Las pilas de combustible generan una energía térmica en torno del 120 % de su energía nominal eléctrica. Esta energía térmica es compleja de gestionar, ya que es necesario disiparla directamente al ambiente o integrarla en algún tipo de intercambiador de calor. Por eso, en el banco de ensayos del CNH2 los sistemas de refrigeración están ubicados en el exterior, concretamente en el espacio colindante de la zona interior de los ensayos de la pila, conectándose las tuberías y el cableado necesarios para su funcionamiento.

En algunos casos, los fabricantes de módulos de pila de combustible incluyen su propio sistema de refrigeración que es instalado según los requisitos e indicaciones en las instalaciones del CNH2 en el espacio abierto y contiguo a la ubicación de la pila mencionado anteriormente, permitiendo que la conexión sea flexible, rápida y sencilla. En el caso de que el fabricante no incluya un sistema de refrigeración, el centro cuenta con un radiador grande para la disipación de la energía térmica.

Además, es primordial monitorear y controlar el caudal, la presión y la temperatura del sistema de refrigeración. La adquisición de los sensores permite calcular la potencia térmica que disipa la pila en cada punto de operación y obtener así la curva de rendimiento térmico.

3.3. Sistema de electrónica de potencia

Los ensayos de módulos de pilas de combustible de altas potencias requieren la evacuación de la energía eléctrica que genera la pila PEM, pero también necesitan una alimentación inicial del BoP (Balance of Plant) durante la fase de arranque, hasta que el stack comienza a realizar la generación de su propio BoP de forma interna.

Por eso, es necesario que a la salida de potencia de la pila PEM se ubique una carga bidireccional que, además de generar o absorber corriente, sea capaz de imponer el nivel de tensión, como si de una batería se tratase.

En el banco de ensayos del CNH2 se utiliza una carga regenerativa bidireccional de hasta 150 kW que se controla a través del protocolo Modbus TCP/IP, configurando un nivel de tensión DC constante según las especificaciones del fabricante de la pila de combustible.

Si la pila de combustible genera potencias superiores a los 150 kW, en el diseño se plantea la instalación de un banco de resistencias que demandará la potencia adicional del módulo

a través de unos relés de control que encienden/apagan diferentes resistencias en paralelo y disipará la energía sobrante. El sistema está integrado en el Controlador Lógico Programable (PLC).

Las tensiones a las que se trabaja son del orden de cientos de voltios, las cuales se aplican en espacios reducidos que están en contacto con el refrigerante. Aunque, el refrigerante suele ser agua desionizada o glicol, es muy importante tener siempre controlado el nivel de aislamiento galvánico. En este caso se realiza con un monitor de aislamiento en línea, que envía una señal analógica que es leída por el PLC. Finalmente, es conveniente tener una fuente de tensión auxiliar que proporcione el voltaje de la instrumentación del sistema de control.

3.4. SCADA

El sistema de supervisión, control y adquisición de datos incluye la interconexión del módulo de la pila de combustible y los subsistemas de la arquitectura del banco de ensayos, el equipamiento adicional y los sistemas de seguridad en el espacio de los ensayos. Los sensores necesarios para adquirir los parámetros son: flujo y presión del hidrógeno, temperatura, presión y flujo del sistema de refrigeración, voltaje y corriente del módulo de la pila y aislamiento del sistema. Asimismo, el sistema cuenta con un sistema de alarmas y supervisión de los límites de las variables a controlar durante los ensayos. La instrumentación del banco de ensayos se controla con un PLC.

El CNH2 trabaja con módulos Beckhoff de Entrada/Salida interconectados mediante EtherCAT que son gestionados con un programa desarrollado en TwinCAT3.

Además, cada banco de ensayos tiene su propio diseño de SCADA cuya interfaz gráfica de usuario (GUI) es implementado en LabVIEW de National Instruments. La GUI permite visualizar, representar y guardar las variables necesarias de los ensayos.

La Figura 4 muestra un ejemplo de SCADA para un banco de pruebas de tres módulos de pila de combustible PEM.

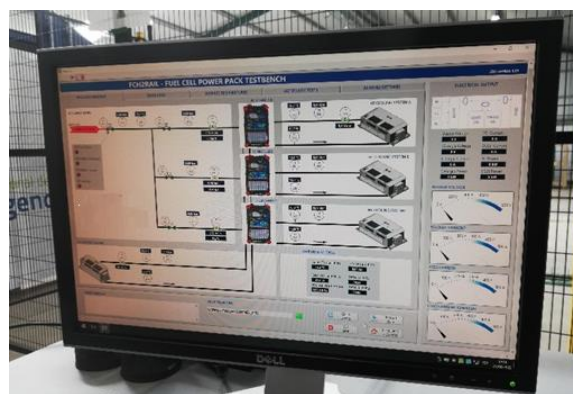


Figura 4: SCADA de un banco de ensayos realizado por el CNH2.

4. Servicios auxiliares en un banco de ensayos

4.1. Ubicación y acondicionamiento del local

En el diseño del banco de ensayos es preciso contemplar el lugar de instalación del mismo, ya que es un sistema grande y

complejo. El local debe tener la suficiente superficie y equipamiento e instrumentación para suministrar H₂, detectores fugas de H₂, alarmas de fuego y protección eléctrica para trabajar en alta tensión.

El CNH2 tiene una nave abierta y despejada de 20x25m para montar los bancos de ensayos, cuyas características finales se adaptan a las necesidades de cada pila. Esta nave cuenta con:

- Instalación de conducciones de H₂ desde el parque de almacenamiento.
- Instalación de detectores de H₂ e incendios con alarmas centralizadas y sistema de corte de H₂.
- Campanas de extracción que se centran en los alrededores del banco de ensayos de la pila de combustible.
- Estudios ATEX y H&S (Health & Safety) específicamente dedicados a la configuración de la pila de combustible.
- Instalación de barrera de seguridad de alta tensión.

4.2. Mesa oscilatoria

El banco de ensayos puede requerir que se pruebe el comportamiento y rendimiento de la pila teniendo en cuenta los ángulos de Tait-Bryan, que según la aplicación en aeronaves o embarcaciones tienen nomenclatura diferente. Para las aplicaciones en aeronaves se refiere a los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada, mientras para el movimiento y oscilación de un barco son ángulos de inclinación, escora y deriva.

La Figura 5 muestra la mesa oscilatoria con la que trabaja el CNH2. Con la mesa oscilatoria es posible modificar los ángulos en diferentes rangos de $\pm 40^\circ$ en cabeceo o inclinación, $\pm 36^\circ$ en alabeo o escora y $\pm 22^\circ$ en guiñada o deriva. Se puede programar un perfil de ángulos según se quiera emular el comportamiento de la aeronave o embarcación a la vez que se realizan los ensayos de la pila de combustible.

El movimiento de la mesa oscilatoria es independiente al SCADA, ya que tiene su propio sistema de control, pero los ángulos de inclinación obtenidos son adquiridos con un inclinómetro situado en la estructura de la pila de combustible, integrándose en el SCADA final y almacenándose junto con el resto de datos obtenidos.

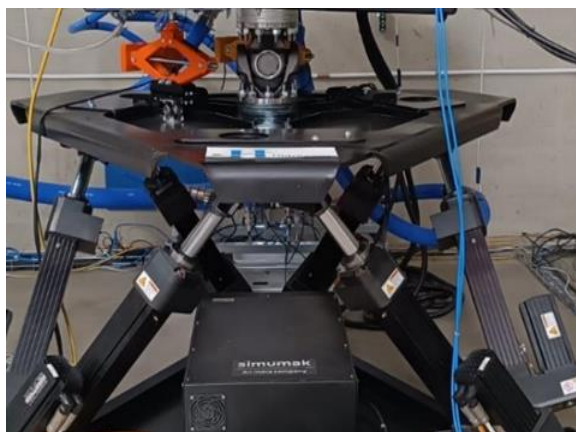


Figura 5: Mesa oscilatoria.

4.3. Sistema de seguridad

Para la puesta en marcha del banco de ensayos de la pila, es indispensable contar con la logística adecuada para cumplir las normas de seguridad durante los ensayos a realizar. El CNH2 dispone tanto de medidas seguridad para la nave donde se realiza el montaje del banco de ensayos como para el personal.

Las medidas de seguridad implementadas son:

- Nave
 - Centralita de alarmas para detectar la concentración de hidrógeno y fuego.
 - Campanas extractoras.
 - Barrera de seguridad de alta tensión.
- Personal
 - Equipos de protección individual (EPIs).
 - Detectores de H₂ portátiles para ser utilizados durante los ensayos.
 - Formación en Prevención de Riesgos Laborales (PRL).

5. Resultados Experimentales

El SCADA diseñado por el CNH2 para el banco de ensayos realiza la adquisición y almacenamiento de datos con un tiempo de muestreo mínimo de 200 ms, el cual puede ser modificado según las necesidades de los ensayos. Las señales que se adquieren son la corriente y el voltaje de la pila de combustible, las temperaturas de entrada y salida del sistema de refrigeración de la pila, la presión, temperatura y caudal del hidrógeno, la resistencia de aislamiento del banco de ensayos, la temperatura, la humedad y la presión del lugar de los ensayos, entre otros parámetros necesarios. Igualmente, se almacenan los eventos y alarmas que se produzcan durante los ensayos.

Las pruebas realizadas en el banco de ensayos permiten caracterizar y analizar el comportamiento de la pila a diferentes condiciones de operación y/o condiciones ambientales, teniendo en cuenta que la duración de los ensayos es variable, desde minutos hasta días.

La Figura 6 muestra la evolución del voltaje y la corriente de una pila de combustible a lo largo del tiempo durante un ensayo de curva de polarización.

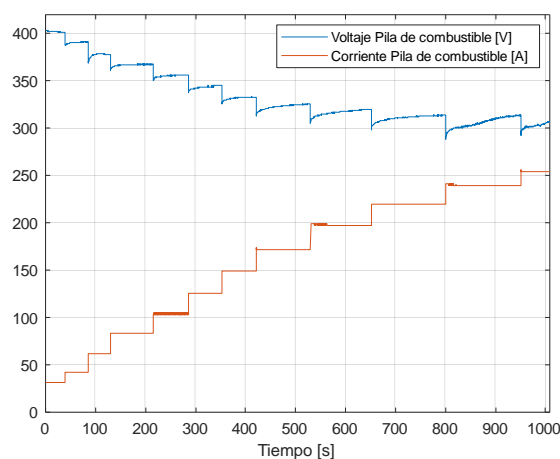


Figura 6: Corriente y voltaje de la pila de combustible

Con los datos de corriente y voltaje obtenidos en la Figura 6 se representa la curva de polarización de la pila de combustible en la Figura 7 y de esta forma se obtiene el comportamiento de la pila bajo condiciones estacionarias, es decir, que las variables no sufren variaciones en el tiempo. Durante el ensayo se tiene en cuenta que la pila tiene que estabilizar los valores para que los resultados sean fiables (Gallego Pérez, 2013).

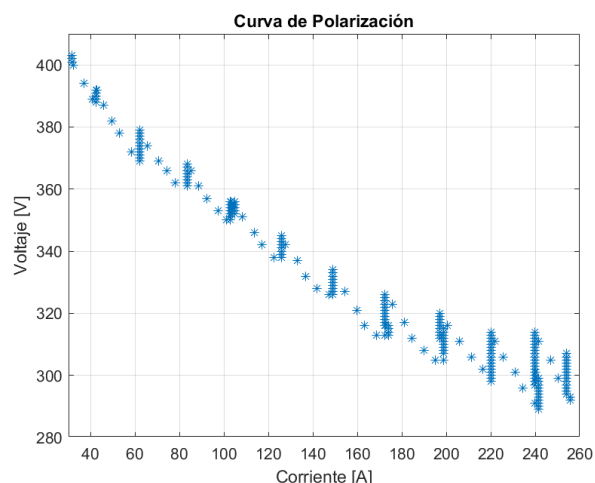


Figura 7: Curva de polarización

Asimismo, en la Figura 8 se muestran las temperaturas de entrada y salida del sistema de refrigeración de la pila durante el mismo ensayo, con las cuales se calcula el calor disipado y la eficiencia térmica de la pila.

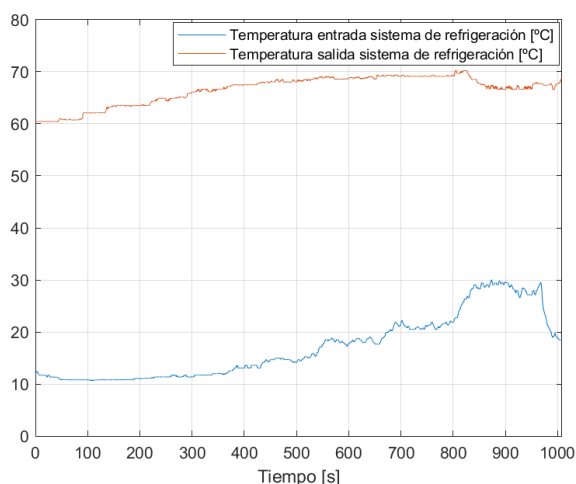


Figura 8: Temperatura de entrada y salida del sistema de refrigeración

6. Conclusiones

En este trabajo se propone un banco de ensayos para módulos de pilas de combustible de membrana polimérica (PEM) de 100 kW a 1 MW caracterizándolo por su amplia versatilidad para trabajar con diferentes fabricantes de pilas de combustibles tipo PEM y su flexibilidad en la integración con las conexiones, protocolos de comunicación y equipamiento del sistema de control propio de la pila y el sistema de control

del banco de ensayos diseñado por el CNH2, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad para el personal y la nave.

Al mismo tiempo, el banco permite desarrollar diferentes tipos de ensayos que junto con su sistema de monitorización, adquisición y almacenamiento de datos faculta que se visualicen los parámetros de la pila en tiempo real, y luego realizar los análisis para caracterizar el funcionamiento de la pila.

Referencias

- Centro Nacional del Hidrógeno. (28 de 05 de 2024). *EL CNH2*. Obtenido de <https://www.cnh2.es/sobre-cnh2/>
- De Aragón, E. (28 de 05 de 2024). *H2 Hidrógeno Verde*. Obtenido de <https://hidrogeno-verde.es/icb-banco-de-pruebas-pilas-de-combustible/>
- Gallego Pérez, P. (09 de 2013). Caracterización experimental de una pila de combustible con metanol directo. 2013. Legánes, España. Recuperado el 28 de 06 de 2024, de <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/32c68267-32c7-4665-80e3-73df014c706e/content>
- PTI - TransEner + Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (2024). *Avanzamos en la construcción de la infraestructura del Banco PEM*. Recuperado el 27 de 06 de 2024, de <https://pti-transener.csic.es/avanzamos-en-la-construccion-de-la-infraestructura-del-banco-pem/>
- W.Q. Tao, C.H. Min, X.L. Liu, Y.L. He, B.H. Yin, W. Jiang. (2006). Parameter sensitivity examination and discussion of PEM fuel cell simulation model validation: Part I. Current status of modeling research and model development. *Journal of Power Source*, 160, 359-373. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.01.078>
- Zambrano Hernández, M. (2020). Análisis del comportamiento de celdas de combustible durante diferentes regímenes de operación y ante variaciones de parámetros de funcionamiento y perturbaciones externas, para pilas de combustible de PEM utilizando sistema DAQ multifunción.