

DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN PARA ENSAYO DE PILAS DE COMBUSTIBLE EN CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE VUELO DE UN AVIÓN NO TRIPULADO

GONZÁLEZ ESPASANDÍN, Óscar⁽¹⁾; NAVARRO ARÉVALO, Emilio⁽²⁾

RASO GARCÍA, M. Ángel⁽³⁾; LEO MENA, Teresa J.^{*(4)}

* teresa.leo.mena@upm.es

⁽¹⁾ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Aeronáuticos

⁽²⁾ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Aeronáutica y del Espacio, Dpto. de Mecánica de Fluidos y Propulsión Aeroespacial

⁽³⁾ Universidad Complutense de Madrid, Fac. CC Químicas, Dpto. de Química Física I

⁽⁴⁾ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Navales, Dpto. de Arquitectura, Construcción y Sistemas Oceánicos y Navales

RESUMEN

Después de estudiar la idoneidad de las pilas de combustible tipo PEM de hidrógeno y DMFC de metanol directo para su utilización en sistemas propulsivos de aeronaves no tripuladas (UAV), se procedió a simular sus respectivas curvas de polarización en condiciones de vuelo. Es importante estudiar cómo afecta al rendimiento de las pilas de combustible la variación de las condiciones atmosféricas durante el vuelo de un UAV, dado que la mayor parte de los sistemas comerciales están concebidos para su uso en tierra. Por tanto, es de interés la validación de esos modelos de simulación a partir de datos experimentales. Para ello, se presenta en este trabajo el diseño de un banco experimental climatizado de pilas de combustible, en el que poder variar magnitudes como la presión atmosférica, la temperatura o la humedad relativa. Permitirá elegir los casos simulados de mayor interés típicos de la envolvente de vuelo de distintos tipos de UAV en función de las características de la instalación. El banco consiste en una cámara climática estanca y aislada térmicamente a la que van conectados un circuito de refrigeración con intercambiador de calor y una bomba de vacío. En una segunda fase se incluirá un evaporador para el estudio de la humedad relativa. Se elige control PID mediante sonda PT100 y sensores de presión y humedad. El diseño permite condiciones suficientes de estabilidad geométrica y temporal en el interior de la cámara como para estudiar los casos elegidos. Estudios previos similares, se centran en pilas de combustible alimentadas con hidrógeno. En este caso se pueden estudiar también pilas de combustible de metanol, para la que ya existen ejemplos de UAV.

Palabras clave: ensayos climáticos, UAV, pilas de combustible

1. Introducción

Los UAV están viviendo un auge espectacular en los últimos años. Uno de los campos de interés es la progresiva sustitución de los sistemas de propulsión basados en motores de combustión interna, dada su dependencia de los combustibles fósiles, por otros sistemas de propulsión alternativos. Existen motivaciones medioambientales, económicas e incluso políticas.

Las pilas de combustible poseen ventajas como son las nulas o bajas emisiones contaminantes a la atmósfera o el bajo nivel de ruido emitido y a nivel operativo el permitir una mayor autonomía en la misión de los UAV [1]. Apenas existen fabricantes que diseñen pilas de combustible específicas para su uso en UAV. Por ello, resulta de interés estudiar cómo afectan las condiciones atmosféricas al rendimiento de las pilas de combustible, para lo que se han elegido pilas de combustible tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) de hidrógeno y DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*) de metanol directo [2] como tipos más interesantes.

En una primera fase, se han obtenido mediante simulación las curvas de polarización para estos tipos de pila analizando su variación con parámetros como son la presión, la temperatura y la humedad relativa [3]. De esta forma se puede obtener una medida de variación del rendimiento de la pila de combustible en condiciones de vuelo del UAV, influenciadas por la altitud y las condiciones climatológicas.

La siguiente fase consiste en la validación experimental de los modelos desarrollados y que conducirá al ajuste de los mismos. Ello requiere del diseño de una instalación experimental que permita reproducir las condiciones atmosféricas previamente simuladas. El elemento más importante de esta instalación será la cámara climática.

Existen precedentes en la experimentación de pilas de combustible en cámaras climáticas, con el objeto de reproducir condiciones de vuelo. Algunos ejemplos son:

- F. Rinaldi y R. Marchesi [4] ensayaron pilas PEM de hidrógeno en cámara climática variando las condiciones de temperatura y humedad, pero sin modificar el valor de la presión, por lo que únicamente pueden cubrir casos de vuelo a baja cota.
- T. Hordé *et al* analizaron la influencia de la altitud [5] sobre el comportamiento de pilas PEM de hidrógeno. Los ensayos no se llevaron a cabo en una cámara, sino en localizaciones a distintas altitudes en los Alpes Franceses (máximo 2200 m), por lo que tampoco se cubre una gran variedad de casos de vuelo, ni existe un control o repetibilidad de las condiciones de ensayo.
- S. Bégot *et al* han estudiado [6] pilas PEM de hidrógeno en cámara climática, controlando la temperatura y la humedad, para aplicaciones aeronáuticas.

La novedad del presente artículo radica en que se combinarán en una misma cámara climática las variaciones de presión y temperatura, en una primera etapa, y variaciones de humedad relativa en una etapa posterior. Además, se estudiará no sólo cómo afectan las condiciones atmosféricas de vuelo al rendimiento de pilas PEM de hidrógeno para aplicación en UAV, sino también su influencia sobre pilas de tipo DMFC de metanol.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es el diseño de una instalación experimental para el ensayo de pilas de combustible de aplicación en UAV, de forma que se puedan reproducir las condiciones

atmosféricas de distintos casos de interés, variando presión, temperatura y humedad relativa. Se pretende que la obtención de esas variables sea repetible y que los valores de consigna se mantengan de forma estable. Se obtendrá la curva de polarización experimental para cada pila.

Puesto que las variables a medir irán cambiando según el tipo de pila de combustible y sus condiciones de operación, una de las necesidades de la instalación experimental debe ser su configuración abierta para poder adaptarse fácilmente a las condiciones requeridas en ese momento.

3. Descripción del sistema

3.1. Esquema general

El esquema general de la instalación se ilustra en la Figura 1.

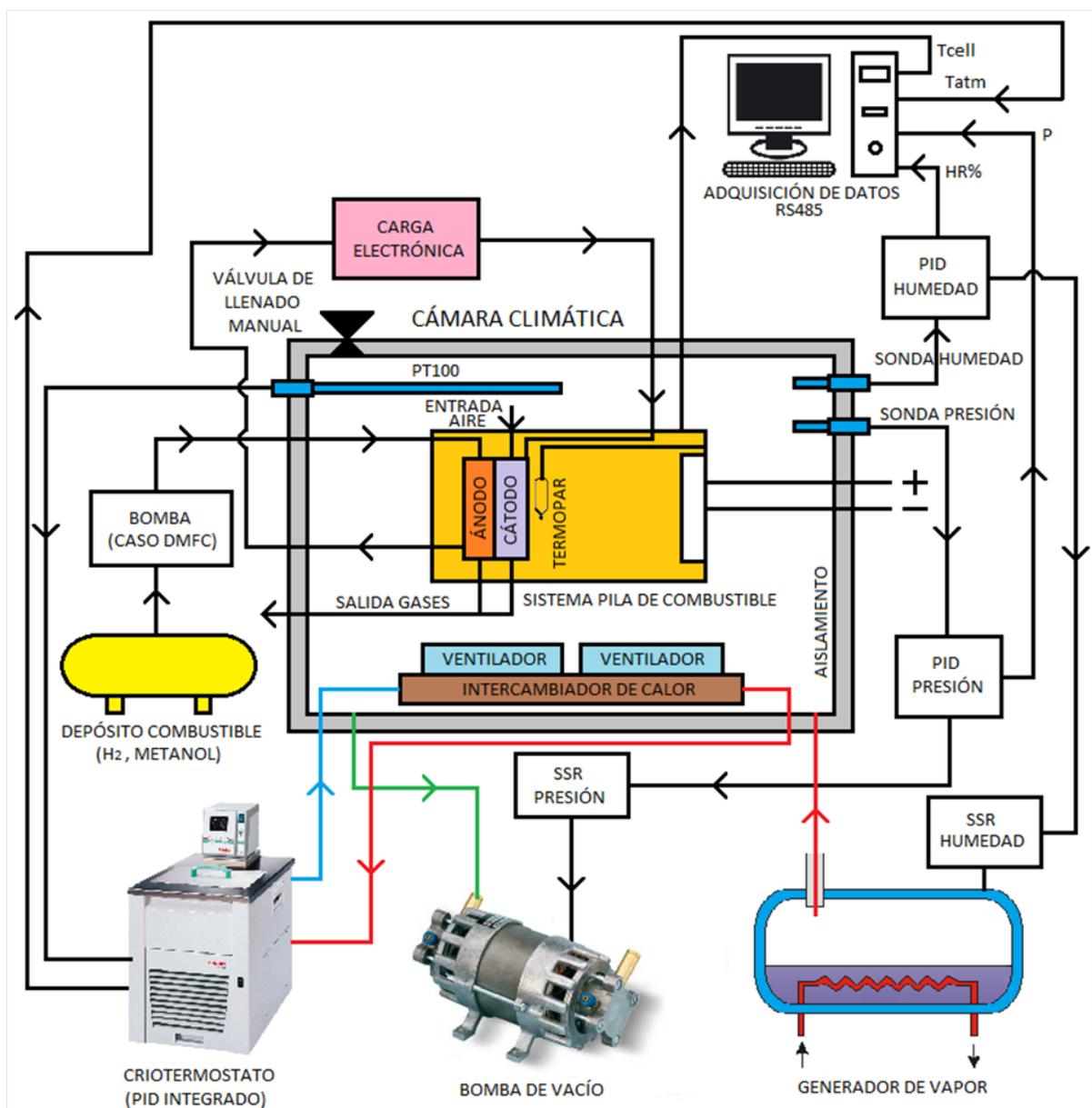


Figura 1: Esquema general de la instalación experimental.

3.2. Cámara climática

La cámara climática es la encargada de albergar a la pila de combustible y mantener las condiciones atmosféricas requeridas. Está construida en metacrilato y sus dimensiones interiores son de 360 x 260 x 230 mm (largo x ancho x alto). Estando dotada de un panel superior que actúa a modo de tapa y por el que se tiene acceso al interior para poder intercambiar la pila de combustible a ensayar y a los demás componentes que forman parte de la instalación de medida y control del sistema. La estanqueidad de la cámara se garantiza mediante juntas de neopreno resistentes a bajas temperaturas (hasta -30 °C).

En cuanto al sistema de control de temperatura, se utiliza un criotermostato de circulación Julabo F33 conectado a un circuito externo acoplado a la cámara climática. De esta forma se pueden alcanzar temperaturas de hasta -30 °C. El fluido refrigerante circula por un tubo de cobre hasta un intercambiador de calor también de cobre de 278x125x30 mm situado en el interior de la cámara. Para garantizar la estabilidad espacial y temporal de la temperatura el intercambiador está dotado de dos ventiladores de 120x120x25 mm que logran mejorar la homogeneización y el tiempo de respuesta.

Para obtener las condiciones de baja presión se utiliza una bomba de vacío de álabes giratorios, con un estator de metal sinterizado autolubricante, de forma que no necesita aceite y se evitan problemas de lubricación por mezclado del aceite con el agua proveniente de la humedad de la cámara.

Con el fin de evitar pérdidas de temperatura se aísla térmicamente el conjunto de la cámara y tubos exteriores mediante láminas de caucho nitrilo resistentes a bajas temperaturas (hasta -40 °C).

Además, en el cuerpo de la cámara se practican los taladros necesarios para poder introducir el cableado de los sensores y demás elementos eléctricos, tuberías de refrigeración, alimentación de combustible y escapes de la pila, estando dotados de pasamuros estancos.

Con el fin de poder modificar la humedad ambiente se añadirá un sistema de generación de vapor que por medio de un calderín inyecte vapor de agua en la cámara climática.

3.3. Sistema de control

El sistema de control de temperatura se realiza por medio del propio controlador PID del criotermostato, que recibe la señal de temperatura de una sonda PT100 ubicada en la zona central de la cámara climática.

El sistema de control de presión se basa en un controlador PID, a cuya entrada se conecta el sensor de presión situado dentro de la cámara climática. A la salida se conecta un relé de estado sólido que acciona la bomba de vacío.

En cuanto al control de humedad, el sistema es análogo al de presión pero con un sensor de humedad. En este caso el relé regula el funcionamiento del calderín. Los sensores se conectan a un sistema de adquisición de datos, que se comunica con un ordenador mediante una tarjeta RS485.

3.4. Sistema pila de combustible

La pila de combustible, bien sea de tipo PEMFC de hidrógeno o DMFC de metanol, se sitúa en el interior de la cámara climática, en la zona central. Durante el ensayo se registra la curva de polarización, es decir, la tensión de salida de la pila de combustible frente a la densidad de corriente y se mide la temperatura de la misma mediante termopares de tipo T.

Para la alimentación del combustible, en el caso de pilas DMFC se utiliza bien una bomba Jasco PU-2086 Plus HPLC o bien un depósito abierto que contiene la solución acuosa de metanol. En el caso de pilas PEMFC, la alimentación se realiza mediante la utilización de un depósito presurizado de hidrógeno. La alimentación de oxidante se realiza en todos los tipos de pilas

haciendo circular aire de la cámara climática por el interior de las pilas. En los ensayos se controla el gasto de los combustibles, así como la humidificación del hidrógeno si es el caso. Para controlar y modificar la carga que se une a la pila de combustible, cerrando el circuito eléctrico, se utiliza una carga electrónica.

Las pilas de combustible a ensayar se dotan de un sistema calefactor para poder controlar su temperatura. En simulaciones previas se ha observado un gran deterioro del rendimiento de las pilas de combustible cuando su temperatura decae libremente con la altitud, por lo que puede ser necesario calefactarlas.

4. Casos de estudio

Con la utilización de la instalación descrita anteriormente se pretende determinar la curva de polarización de pilas de combustible de tipo PEMFC/H₂ y de pilas de combustible de tipo DMFC para cinco altitudes diferentes (0 m, 300 m, 1000 m, 3000 m y 5000 m), que se corresponden con cinco categorías distintas de UAV. En función de las altitudes citadas, se fijarán los valores de presión, temperatura y humedad a consignar en la cámara climática. Los valores de presión y temperatura se obtendrán a partir del modelo de atmósfera estándar ISA (International Standard Atmosphere) [7], y el valor de la humedad se obtendrá a partir del 'Air Force Geophysics Laboratory (AFGL) Atmospheric Constituent Profiles (0-120 km)' [8]. Por su interés se consideran cuatro casos diferentes:

- Pila PEMFC/H₂: variación de las condiciones atmosféricas en función de las altitudes especificadas, manteniendo constante la temperatura de operación de la pila de combustible. La presión del cátodo será la presión atmosférica.
- Pila PEMFC/H₂: en condiciones ambiente correspondientes a vuelo horizontal a 3.000 m, una altitud típica para un UAV de corto alcance, se fijarán varios valores para la temperatura de la pila, siendo la presión del cátodo la atmosférica correspondiente a 3.000 m y variando la humedad relativa desde HR=0% a HR=100% (simulando el paso a través de nubes).
- Pila DMFC: variación de las condiciones atmosféricas en función de las altitudes especificadas, manteniendo constante la temperatura de operación de la pila de combustible. Se fijarán varios valores para la temperatura de la pila.
- Pila DMFC: en condiciones ambiente correspondientes a vuelo horizontal a 3.000 m, se fijarán varios valores para la temperatura de la pila y se modificará la humedad relativa desde HR=0% a HR=100%.

En una primera fase sólo se realizarán ensayos controlando la temperatura y la presión, para posteriormente, en una segunda fase añadir el control de humedad. En esta segunda fase, la combinación de las tres magnitudes (presión, temperatura y humedad) complica el control, ya que la temperatura ambiente influye en la humedad, especialmente a temperaturas bajo cero, donde gran parte del vapor introducido condensará en las paredes. En todos los ensayos se hará necesario estabilizar la temperatura antes de empezar a controlar la humedad y la presión. Todo esto requerirá de la realización de ensayos previos de caracterización de la cámara climática, para lograr la repetibilidad deseada durante los ensayos.

5. Conclusiones y consideraciones finales

El diseño presentado permitirá estudiar la influencia en el rendimiento de la pila de combustible de las variaciones de las condiciones atmosféricas a las que está sometido un UAV durante su vuelo, permitiendo validar los modelos de simulación desarrollados previamente. Además, la información obtenida podrá servir como base para optimizar las pilas de combustible utilizadas en el sistema propulsivo de UAV y de su sistema de control.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación por medio del Proyecto N° ENE2011-28735-C02-02 y por la Consejería de Educación, Cultura y Deporte de la Comunidad de Madrid por medio del Proyecto S2013/MAE-2975 PILCONAER.

7. Referencias

- [1] GONZÁLEZ-ESPASANDÍN, Ó. LEO MENA, T. J., NAVARRO ARÉVALO, E. *Fuel cells: a real option for unmanned aerial vehicles propulsion*. The Scientific World Journal, 2014, Volume 2014, Article ID 497642, 12 pages.
- [2] KANG, K. et al. *Development of Lightweight 200-W Direct Methanol Fuel Cell System for Unmanned Aerial Vehicle Applications and Flight Demonstration*. Fuel Cells, 2014, No 5, pp. 694-700.
- [3] GONZÁLEZ-ESPASANDÍN, Ó. LEO MENA, T. J., RASO, M.A. NAVARRO ARÉVALO, E. *DMFC and PEMFC/H₂ performance under Unmanned Aerial Vehicles environmental flight conditions*. European Hydrogen Energy Conference Proceedings (abstracts: Oral presentations), EHEC 2014 12-14 March, Seville; pp. 371-372.
- [4] RINALDI, F. MARCHESI, P. *Polimeric Electrolyte Membrane Fuel Cells Characterization Test Under Variable Temperature and Relative Humidity Conditions*. Journal of Fuel Cell Science and Technology, August 2007, vol. 4, pp. 231-237.
- [5] HORDÉ, T. ACHARD, P. METKEMEIJER, R. *PEMFC application for aviation: Experimental and numerical study of sensitivity to altitude*. International Journal of Hydrogen Energy, 37 July 2011, vol. 14, pp. 10818-10829.
- [6] BÉGOT, S. HAREL, F. CANDUSSO, D. FRANÇOIS, X. PÉRA, M.-C. YDE-ANDERSEN, S. *Fuel cell climatic tests designed for new configured aircraft application*. Energy Conversion and Management, 2010, vol. 51, no. 7, pp. 1522–1535.
- [7] ISO 2533:1975. Standard Atmosphere.
- [8] ANDERSON, G. P. et al. *Air Force Geophysics Laboratory (AFGL) Atmospheric Constituent Profiles (0-120 km)*. AFGL-TR-86-0110, Environmental Research Papers, No. 954. Air Force Geophysics Laboratory, Optical Physics Division, Hanscom AFB. 15 May 1986.