

Comité de Estudio D1 - Materiales y Técnicas de Ensayos Emergentes para Sistemas de Potencia

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEMFC

J.I. SAN MARTÍN*
Universidad del País Vasco
España

I. ZAMORA
Universidad del País Vasco
España

J.J. SAN MARTÍN
Universidad del País Vasco
España

V. APERRIBAY
Universidad del País Vasco
España

P. EGUIA
Universidad del País Vasco
España

***Resumen** – Los sistemas de pilas de combustible destacan por ser generadores de energía eléctrica y térmica, limpios y de elevada eficiencia global. Las características de estos sistemas dependen de numerosos parámetros, tales como: temperatura, presión del combustible y del oxidante, caudal de los mismos, etc. En este sentido, esta influencia debe ser evaluada para caracterizar adecuadamente el comportamiento de las pilas de combustible, en orden a facilitar su integración en el sistema eléctrico.*

Se realiza el estudio teórico y experimental de la respuesta dinámica de un sistema de pila de combustible comercial. Los resultados de este análisis, pueden ser utilizados para extrapolarlos a modelos de capacidad superior, habida cuenta de la capacidad de escalado que muestran estas tecnologías.

En este contexto, se presenta un resumen de las distintas modalidades de pilas de combustible, destacando las propiedades más relevantes de las mismas. Se realiza una revisión de aquellas expresiones fundamentales que están asociadas a este tipo de generadores.

Finalmente, se somete al sistema de pila de combustible a diferentes pruebas, con el fin de testear su comportamiento.

Palabras clave: Pilas de Combustible – Tecnología PEM – Hidrógeno – Eficiencia – Energía Eléctrica y Térmica

1 INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible son dispositivos que permiten generar energía eléctrica, mediante procesos no contaminantes, y proporcionar energía térmica para varias aplicaciones. Estas modalidades energéticas son posibles a partir de la energía química de un combustible, mediante reacciones electroquímicas entre el combustible y un oxidante. La potencia nominal de las pilas de combustible oscila desde algunos W hasta MW para unidades portátiles y estacionarias, respectivamente [1].

Estos dispositivos pueden utilizar varios tipos de combustibles ricos en hidrógeno, tales como el gas natural, gasolina, biogás, alcoholes o el propano. La utilización de hidrocarburos genera derivados tales como el CO y el CO₂, pero dada la elevada eficiencia de estos dispositivos, para cantidades equivalentes de energía eléctrica producida, las emisiones de CO₂ pueden ser reducidas a la mitad o menos, con el correspondiente beneficio medioambiental. Funcionan a diferentes presiones y temperaturas, las cuales varían desde la presión atmosférica, hasta 100 veces ésta y desde 20 hasta 1000 °C, respectivamente [2].

Por otra parte, las energías renovables y las tecnologías basadas en el hidrógeno, como vector energético, actualmente se consideran como una excelente alternativa para amortiguar, en parte, los aspectos negativos de un escenario energético altamente contaminante. En este sentido, los excedentes de producción de energía eólica, solar o hidráulica, pueden destinarse a la producción de hidrógeno mediante un electrolizador y utilizar el mismo para inyectarlo en las pilas de combustible. La energía eléctrica generada por las pilas de

* e-mail: joseignacio.sanmartin@ehu.es

combustible, puede apoyar a los sistemas interconectados en las horas punta o abastecer la red eléctrica en los sistemas aislados de potencia [3].

En este contexto, la tecnología de las pilas de combustible presenta numerosas características que les otorga un prometedor futuro. En relación a su elevada eficiencia, se puede destacar que además es poco dependiente del tamaño del sistema, permitiendo su utilización en diferentes rangos energéticos mediante diseños modulares. Por otra parte, pueden operar a media carga, manteniendo usos óptimos del combustible. Estas últimas precisiones favorecen su integración en sistemas de Generación Distribuida, Trigeneración Energética y Tecnologías Híbridas [4-5], concretamente en el diseño de Micro-redes Eléctricas aisladas o interconectadas [6].

En la figura 1, se puede observar un resumen de las distintas tecnologías de pilas de combustible. En ella observamos que las modalidades de alta temperatura, SOFC y MCFC, presentan tiempos de arranque elevados y por eso están llamadas a representar un papel relevante como unidades para trabajar con carga constante. Las tecnologías de baja temperatura, PEMFC, DMFC, AFC y PAFC, tienen tiempos de arranque inferiores y pueden trabajar como unidades generadoras con funcionamiento con programa y algunos modelos pueden apoyar a la red como unidades generadoras en horas punta [7-8-9-10].

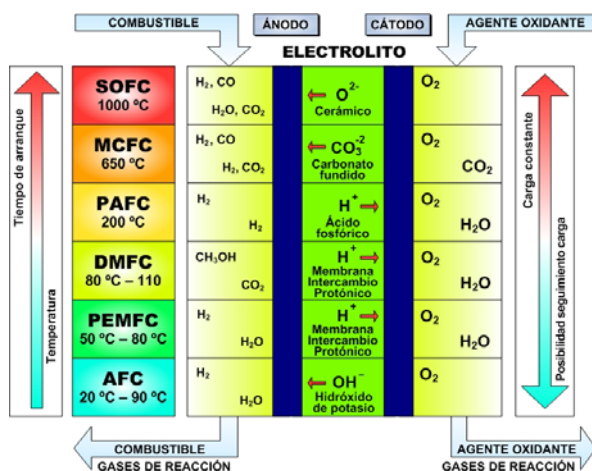


Fig. 1. Tecnologías de pilas de combustible

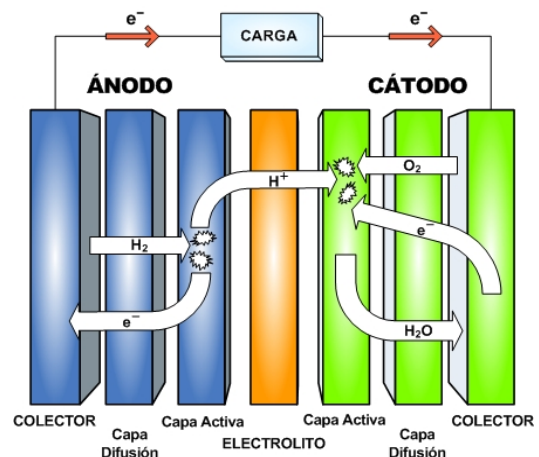
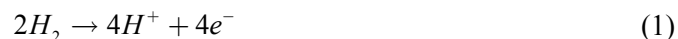


Fig. 2. Esquema de pila de combustible PEM

2 PILA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEMFC)

Esta pila de combustible está constituida por siete partes fundamentales: la capa activa, la capa difusora y los terminales del ánodo, del cátodo y la membrana [11]. En la figura 2, se puede apreciar la disposición de los distintos elementos que constituyen esta pila de combustible.

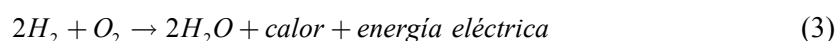
A continuación se indica el modo de operación de esta pila de combustible. El hidrógeno se introduce en el ánodo y llega, por difusión, hasta la capa catalítica del ánodo, donde se produce la reacción electroquímica indicada en la expresión (1).



Los electrones se dirigen hacia la placa colectora del ánodo y llegarán a través de un circuito externo de carga, al cátodo. Los protones producidos cruzarán la membrana hacia el cátodo, según la reacción (2).



Siendo la reacción global la indicada en (3).



En orden a efectuar distintas pruebas experimentales en la pila de combustible, se deben tener en cuenta un conjunto de expresiones que se utilizan en estos sistemas y que se mencionan a continuación.

La tensión de salida de una célula simple puede definirse mediante la ecuación (4), [12].

$$v_{FC} = E_{NERNST} - v_{act} - v_{ohmic} - v_{con} \quad (4)$$

En la ecuación (4), E_{NERNST} es la tensión reversible, v_{act} es el sobrepotencial activación, v_{ohmic} es el sobrepotencial óhmico y v_{con} representa el sobrepotencial de concentración.

En relación a la tensión reversible de la célula, E_{NERNST} es la tensión obtenida en la célula sin carga, [13]. El valor que toma esta tensión viene dado por la expresión (5).

$$E_{NERNST} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (5)$$

donde: ΔG es la variación de la energía libre de Gibbs (J/mol); F es la Constante de Faraday ($96487 C$); ΔS es la variación de entropía (J/mol); R es la Constante universal de los gases ($8314 J/mol K$); P_{H_2} y P_{O_2} son las presiones parciales del hidrógeno y el oxígeno (atmósferas), respectivamente. La variable T denota la temperatura de operación de la célula en K , y T_{ref} , la temperatura de referencia. Utilizando valores estándar para ΔG , ΔS y T_{ref} , la expresión (5) puede ser simplificada [14], tal y como se indica en la ecuación (6).

$$E_{NERNST} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot T \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (6)$$

Para considerar el modelo dinámico de la pila de combustible, es necesario considerar el fenómeno conocido como “carga de doble capa”, [15]. La ecuación diferencial que permite obtener la relación dinámica está representada por la expresión (7).

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{1}{C} i_{FC} - \frac{1}{\tau} v_d \quad (7)$$

donde: v_d representa la tensión dinámica de la pila de combustible (V), C es la capacidad eléctrica equivalente (F) y τ es la constante de tiempo eléctrica (s), definida como se indica en la expresión (8).

$$\tau = R_a C = C (R_{act} + R_{con}) = C \left(\frac{v_{act} + v_{con}}{i_{FC}} \right) \quad (8)$$

donde R_a representa la resistencia equivalente.

Agrupando términos se obtiene la tensión de la pila de combustible, definida por la expresión (9).

$$v_{FC} = E_{NERNST} - v_d - v_{ohmic} \quad (9)$$

Por otra parte, en un stack del sistema de pila de combustible alimentado con hidrógeno puro, el consumo de combustible puede ser obtenido por la expresión (10), [15].

$$m_{H_2} = 1.05 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_s}{v_{FC}} \quad (10)$$

donde: m_{H_2} es el the ratio de flujo de hidrógeno (kg/s); v_{FC} la tensión de la pila de combustible (V), obtenida en la expresión (9); P_s es la potencia eléctrica del stack (W), que se obtiene de la expresión (11).

$$P_s = n \cdot v_{FC} \cdot i_{FC} \quad (11)$$

donde n es el número de células, conectadas en serie, que son utilizadas para formar el stack.

El ratio de flujo de aire (kg/s) puede ser obtenido a partir de la expresión (12).

$$m_{air} = 3.57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_s}{v_{FC}} \quad (12)$$

donde λ es el ratio estequiométrico del aire.

El ratio de producción de agua (kg/s), en la operación de un stack se calcula a través de la expresión (13).

$$m_{H_2O} = 9.34 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P_s}{v_{FC}} \quad (13)$$

La mayoría de las variables vistas hasta ahora, dependen en las pilas de combustible de la presión y de la temperatura de operación. Si se modifican las condiciones de operación, afectan directamente al funcionamiento de estos dispositivos, a mayores temperaturas y presiones de operación, se incrementará la tensión de la pila de combustible y la eficiencia, para una determinada corriente.

La temperatura de operación de una pila de combustible puede ser obtenida de la ecuación (14).

$$M \cdot C_s \frac{dT}{dt} = \Delta Q \quad (14)$$

donde: M es la masa de la pila (kg); C_s es el coeficiente de calor específico medio equivalente (J/kgK) y ΔQ es el ratio de variación de calor (J/s).

El valor para el producto $M \cdot C_s$ se obtiene mediante la suma de las masas individuales y el coeficiente de calor de todos los componente de la célula.

El ratio de variación de calor, ΔQ , es la diferencia entre el ratio del calor generado en la operación de la pila de combustible y el ratio de calor liberado por el sistema de enfriamiento de la misma, tal y como se indica en la expresión (15).

$$\Delta Q = Q_{gen} - Q_{rem} \quad (15)$$

El ratio de generación de calor de la pila de combustible se puede obtener mediante la expresión (16).

$$Q_{gen} = P_{FC} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (16)$$

donde: P_{FC} es la potencia eléctrica de salida de la pila de combustible y η es la eficiencia de la misma.

3 MÓDULO DE PILA DE COMBUSTIBLE PEM NEXA™

El módulo Nexa (Ballard Power Systems Inc.), [16] es un sistema de pila de combustible que está totalmente automatizado. En la figura 3, se indican los diferentes dispositivos que integran este sistema y las especificaciones del mismo se pueden observar en la figura 4.

En la figura 5, se puede apreciar la ubicación del sistema de pila de combustible descrito, en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del País Vasco (España).

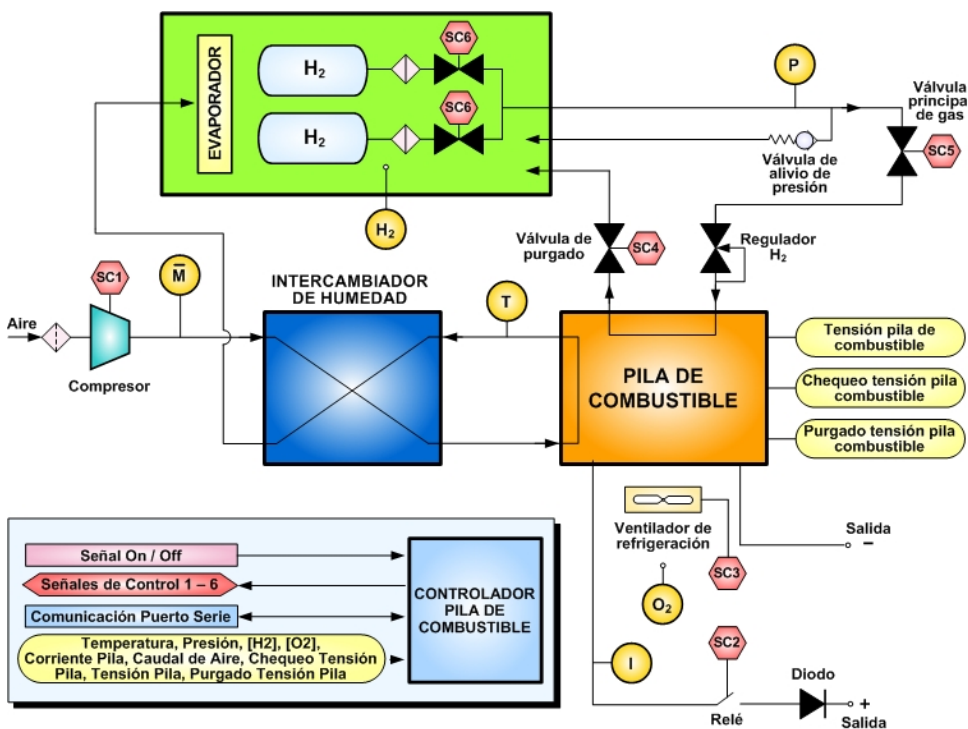


Fig. 3: Esquema del sistema de pila de combustible Nexa

PILA DE COMBUSTIBLE NEXA™		
CARACTERÍSTICAS	Potencia nominal neta de salida	1200 W
	Disipación de calor	1600 W
	Corriente	46 A CC
	Tensión	26 V CC
	Tiempo de vida	1500 horas
COMBUSTIBLE	Hidrógeno gaseoso	99,99%, seco
	Presión de alimentación	10 a 250 PSIG
CONDICIONES AMBIENTALES	Temperatura ambiente	3 a 40 °C
	Humedad	0 a 95%
EMISIONES	Agua pura (vapor y líquida)	Máximo 870 mVh
	Partículas de CO, CO ₂ , NO _x , SO ₂	0 ppm
DATOS FÍSICOS	Ruido	72 dBA @ 1m
	Dimensiones	56 x 25 x 33 cm
	Peso	13 kg

Fig. 4: Especificaciones del sistema Nexa

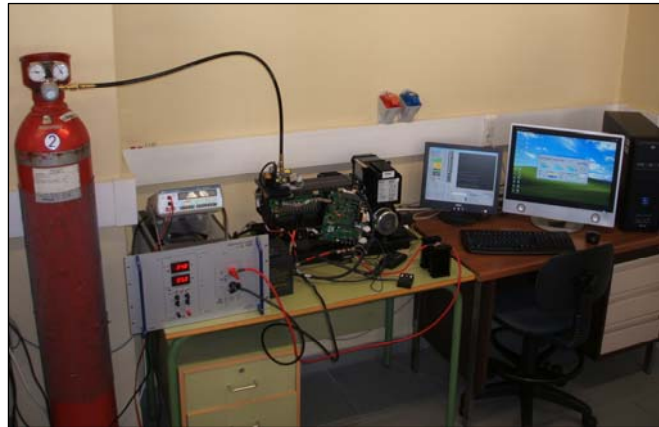


Fig. 5. Laboratorio de pilas de combustible

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En orden a caracterizar el comportamiento del sistema de pila de combustible, objeto de estudio, hemos realizado pruebas en laboratorio, que tratan de mostrar aquellas propiedades más destacadas del mismo. Los resultados obtenidos tratarán de ser extrapolados en el futuro, a modelos de capacidades superiores que actualmente se contemplan en el diseño de Generación Distribuida y Micro-redes Eléctricas.

4.1 Variación de temperatura

La temperatura ambiente a potencia nominal del sistema de pila de combustible objeto de estudio, puede oscilar entre 3°C y 40°C. En este sentido, las curvas de polarización del stack a distintas temperaturas, nos muestran parámetros significativos para la gestión de la potencia y aplicaciones transitorias. Las curvas I-V para el sistema de pila de combustible son medidas mediante el sistema de interrupción de corriente periódica (PCI), técnica que es utilizada para mantener constante la temperatura del stack [17]. Esto significa que el voltaje del sistema del stack se registra con una cierta corriente y temperatura, a continuación la corriente es rápidamente interrumpida y la carga del sistema se ajusta para mantener la temperatura del stack. Mediante esta técnica, se obtienen las curvas a 25, 45 y 65 °C, como se muestra en la figura 6. Conviene no operar en niveles de alta corriente y temperatura ambiente (25 °C), porque los problemas de transferencia de masa y la polarización de concentración pueden reducir la vida del módulo de potencia.

4.2 Resistencia interna

En el funcionamiento normal del sistema de pila de combustible, se presentan unos requerimientos internos de potencia, en orden a alimentar los distintos dispositivos accesorios, como la bomba de aire, ventilador, la placa del circuito de control, etc. Estos dispositivos no pueden separarse del módulo y, por lo tanto, deben ser considerados como una parte integral del mismo. En consecuencia, la resistencia interna equivalente (R_{int}) del módulo no coincide con la resistencia del stack de la pila de combustible, sin embargo se suele admitir que la mayor parte de la R_{int} es debida a la resistencia interna del stack.

Para estudiar las características de la resistencia interna equivalente utilizamos el circuito de la figura 7, [18].

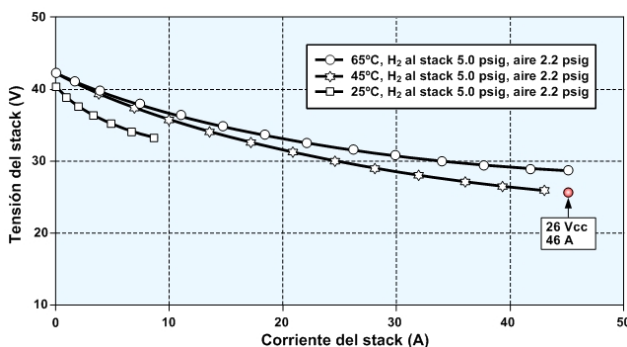


Fig. 6. Características del stack a distintas temperaturas

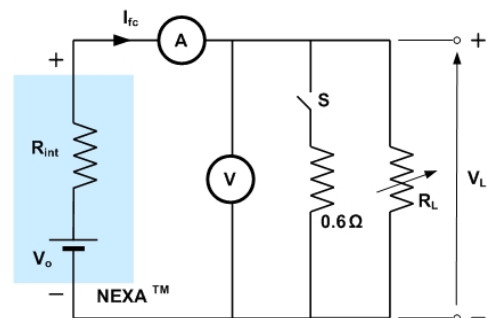


Fig. 7. Medida de la resistencia interna equivalente

En este circuito, V_o es la tensión en circuito abierto, I_{fc} es la corriente de salida del módulo, R_L es la resistencia de carga y V_L es la tensión de salida del módulo cuando se conecta la carga. La resistencia de 0.6Ω se conecta y desconecta frecuentemente mediante el interruptor S , para mantener la temperatura del stack en los niveles deseados para efectuar las mediciones. Ajustando la carga, obtenemos diferentes tensiones de salida del módulo. La resistencia interna equivalente puede ser calculada mediante la expresión (17).

$$R_{int} = \frac{V_o - V_L}{I_{fc}} \quad (17)$$

Al conectar la carga, la tensión de salida, V_L , es siempre inferior a la tensión en circuito abierto, V_o , porque aparecen algunas caídas de tensión, producidas por pérdidas de activación, pérdidas óhmicas y pérdidas de concentración. En consecuencia, aparecen las resistencias equivalentes de activación, óhmica y de concentración, respectivamente.

La resistencia interna total del stack consiste de estas resistencias, las cuales son dependientes de la carga y de la temperatura [19], y pueden condicionar la resistencia interna equivalente del módulo de potencia.

En la figura 8, se puede observar que cuando se aumenta la corriente de salida, la resistencia interna equivalente decrece fuertemente. Esto también es debido en parte a que la conductividad de la membrana queda afectada por el contenido de agua y de la temperatura.

Los resultados de estos experimentos han indicado que la temperatura del stack y la resistencia interna equivalente varían fuertemente con los cambios experimentados por la corriente de la carga. En consecuencia, asumir la temperatura del stack y la resistencia interna equivalente como constantes podría no ser adecuado para el caso del sistema objeto de estudio. Basándose en resultados experimentales [18], se propone para la resistencia interna equivalente del módulo de potencia la expresión (18):

$$R_{int} = A_R + R_o \exp\left(\frac{-I_{fc}}{\tau_R}\right) - B_R \ln(I_{fc}) \quad (18)$$

donde R_{int} es la resistencia interna equivalente, A_R , B_R , R_o y τ_R son parámetros empíricos.

En la figura 8, se puede apreciar la curva correspondiente a la utilización de la expresión (19).

4.3 Consumo de hidrógeno y uso del aire

En relación al hidrógeno consumido, este procede desde un sistema de almacenamiento presurizado, y se inyecta con unas condiciones iniciales de 12.7 bars. Cuando el hidrógeno se consume por el sistema de pila de combustible, su presión decrece, tal y como se puede observar en la figura 9. La tasa de consumo de hidrógeno es proporcional a la densidad de corriente, como se puede observar en la figura 9, de acuerdo a la primera Ley de Faraday. La figura 9 también muestra la tasa de flujo de aire en la entrada. En relación con este aspecto, es importante distinguir entre la tasa de flujo de aire de entrada, que viene dado por la expresión (12), y la tasa de flujo de aire de salida. Esto es particularmente importante al calcular la humedad, que es un factor clave en las pilas de combustible PEM. La diferencia está producida por el consumo de oxígeno: habrá seguramente más vapor de agua en el aire a la salida, pero se considera “aire seco” en esta etapa [15], por lo tanto, el ratio de flujo de aire en la salida se obtiene como la diferencia entre el ratio de flujo de aire en la entrada y el oxígeno utilizado, como se indica en la expresión (19).

$$m_{aire, sal} = \left(3.57 \cdot 10^{-7} \lambda - 8.29 \cdot 10^{-8}\right) \frac{P_s}{v_{fc}} \quad (kg/s) \quad (19)$$

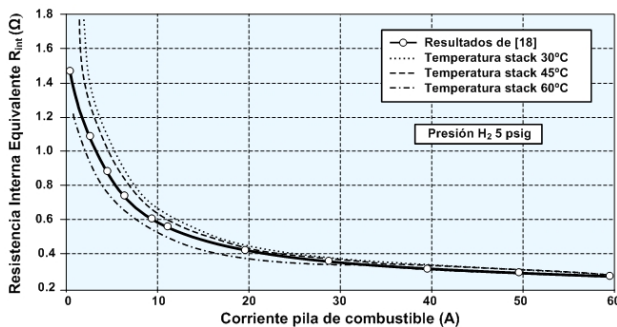


Fig. 8. Resistencia interna equivalente

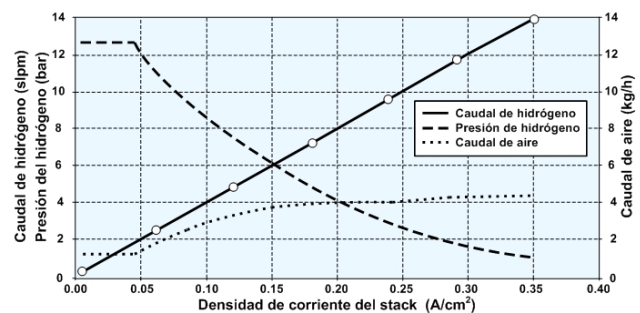


Fig.9. Presiones y ratios de flujo del aire e hidrógeno

Considerando λ (ratio estequiométrico del aire), se puede observar su variación en la figura 10, dependiendo de los valores experimentales de la corriente para el modelo objeto de estudio. En 5.6 A (0.0047 A/cm^2), la curva del ratio estequiométrico del aire decrece suavemente porque el ventilador del inversor entra en funcionamiento. En la figura 11, se aprecia la corriente suministrada a los dispositivos auxiliares.

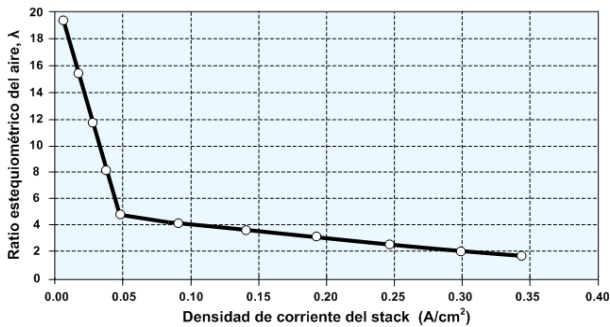


Fig. 10. Variación del ratio estequiométrico del aire

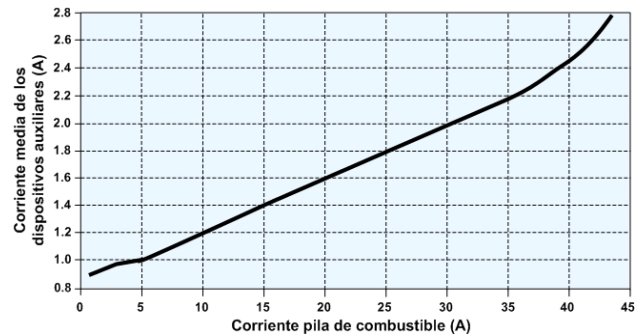


Fig. 11. Corriente de los dispositivos auxiliares

4.4 Potencial de calor recuperado

En una de pila de combustible, la variación de la energía libre de Gibbs viene definida como se expresa en la ecuación (20), [20].

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (20)$$

El término $T \cdot \Delta S$ corresponde al calor liberado al exterior por el sistema de pila de combustible. En este sentido, en la figura 12 se puede observar la temperatura ambiente, la temperatura del stack, la temperatura de salida del aire para el enfriamiento y el caudal de aire para el enfriamiento.

4.5 Eficiencia y Potencia del sistema de pila de combustible

En el estudio del comportamiento de las pilas de combustible, debe distinguirse entre los puntos de máxima eficiencia y de máxima potencia. En virtud de la aplicación concreta, interesará fijar el punto de funcionamiento de la pila de combustible, con alta eficiencia o con alta potencia. A partir del punto de trabajo seleccionado, se derivarán estrategias de control diferentes. En la figura 13, aparecen las gráficas que representan la eficiencia eléctrica y la potencia, para distintos caudales de suministro de hidrógeno.

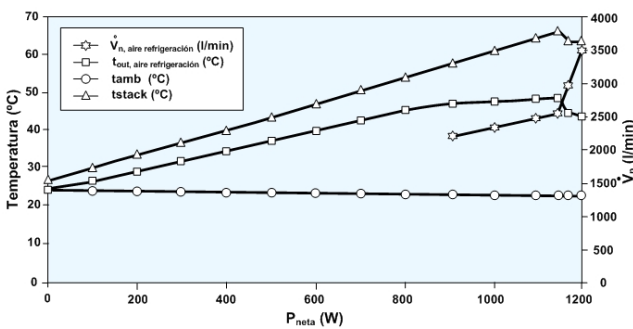


Fig. 12. Caudal de aire y distintas temperaturas

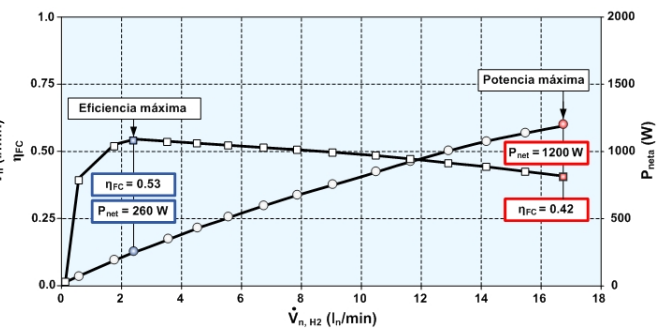


Fig. 13. Eficiencia, potencia y caudal de hidrógeno del módulo de pila de combustible

5 CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado una revisión de las características más relevantes del modelo PEMFC, sometiendo al mismo a una serie de pruebas experimentales. En este sentido, se aporta el estudio de la curva de polarización del stack para diferentes temperaturas y corrientes, destacando la dependencia que muestra la resistencia interna total del stack de esos parámetros.

En relación a la tasa de consumo de hidrógeno, se observa su proporcionalidad con la corriente del stack, en consonancia con la primera Ley de Faraday. Respecto a la utilización del aire, se distingue entre la tasa de flujo de aire a la entrada y la tasa de flujo de aire a la salida. En relación con este aspecto, se aportan datos correspondientes al ratio estequiométrico del aire para diferentes cargas. También se presenta el caudal de aire en función del calor liberado en la reacción electroquímica de la pila y la entalpía del aire.

Por último, se analiza la curva de la potencia del sistema de pila de combustible y la eficiencia eléctrica del mismo. A la potencia nominal de 1200 W, tiene un 41% de eficiencia, mientras que la eficiencia máxima se obtiene para 259 W, siendo el valor de la misma de un 54%.

6 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado por el equipo investigador del Proyecto ENE2006-15700-CO2-02/CON, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España y la Diputación Foral de Guipúzcoa.

7 REFERENCIAS

- [1] M. Farooque, H.C. Maru, "Fuel Cells: The clean and efficient power generators", Proceedings of the IEEE, vol.89, issue 12, pp.1819-1829, 2001.
- [2] W.L. Hughes, "Comments on the hydrogen fuel cell as a competitive energy source", Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting IEEE, vol.1, pp.726-730, 2001.
- [3] K. Rajashekara, "Hybrid Fuel Cell Strategies for Clean Power Generation", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.41, No.3, 2005.
- [4] I. Pilatowsky, R.J. Romero, C.A. Isaza, S.A. Gamboa, W. Rivera, P.J. Sebastian, J. Moreira, "Simulation of an Air Conditioning Absorption Refrigeration System in a Cogeneration Process Combining a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", International Journal of Hydrogen Energy, 2007.
- [5] T.W. Song, J.L. Sohn, J.H. Kim, S.T. Ro, K. Suzuki, "Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell/microgas turbine hybrid power system based on a quasi-two dimensional model", Journal of Power Sources, 2004.
- [6] I. Zamora, J.I. San Martín, A.J. Mazón, J.J. San Martín, V. Aperribay, "Emergent Technologies in Electrical Microgeneration". International Journal of Emerging Electric Power Systems, Volume 3, Issue 2, Article 1092, pp.1-28, October 2005.
- [7] M.W. Ellis, M.R. Von Spakovsky, D.J. Nelson, "Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for 21st century", Proceedings of the IEEE, vol.89, issue 12, pp. 1808-1818, 2001.
- [8] S.Rahman, "Fuel Cell as Distributed Generation Technology", Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting IEEE, vol.1, pp.551-552, 2001.
- [9] J.L. Silveira, E.M. Leal, L.F. Ragonha, "Analysis of a Molten Carbonate Fuel Cell: Cogeneration to produce electricity and cold water", Energy.
- [10] F. Zink, Y. Lu, L. Schaefer, "A Solid Oxide Fuel Cell System for Buildings", Energy Conversion & Management, 2007.
- [11] M. Rubio, A. Urquia, L. González, D. Guinea, S. Dormido, "Fuel Cell Lib-A Modelica Library for Modeling of Fuel Cell", Proceedings of the 4th International Modelica Conference, pp.75-83, 2005.
- [12] J.M. Correa, F.A. Farret, L.N. Canha, "An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using an electrochemical model" Proceedings IEEE, IECON'01, pp.141-146, 2001.
- [13] J.M. Correa, F.A. Farret, L.N. Canha, M.G. Simoes, "An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.51, No.5, pp.1103-1112, 2004.
- [14] R.F. Mann, J.C. Amphlett, M.A.I. Hopper, H.M. Jensen, B.A. Peppley, P.R. Roberge, "Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM Fuel Cell", Journal Power Sources, vol.86, pp.173-180, 2000.
- [15] J.E. Larminie, A.Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Chichester, U.K., Wiley, pp.308, 2000.
- [16] NexaTM Power Module User's Manual, Ballard Power Systems Inc., 2003.
- [17] W.H. Zhu, R.U. Payne, D.R. Cahela, B.J. Tatarchuk, "Uniformity analysis at MEA and stack levels for a Nexa PEM fuel cell System", Journal of Power Sources, pp.231-238, 2004.
- [18] Z. Zhang, X. Huang, J. Jiang, B. Wu, "An improved dynamic model considering effects of temperature and equivalent internal resistance for PEM fuel cell power modules", Journal of Power Sources, pp.1062-1068, 2006.
- [19] C. Wang, M.H. Nehrir, S.R. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cell using electrical circuits", IEEE Transactions, Energy Conversion, pp.442-451, 2005.
- [20] I. Zamora, J.I. San Martín, J.J. San Martín, M. Larruskain, V. Aperribay, "Technologies of fuel cells in Electrical Microgeneration", Proceedings of the International Symposium, MEPS'06, pp.138-143, 2006.