

Determinación teórica y comparación con datos experimentales de la cantidad de agua producida por una celda de combustible de membrana de intercambio protónico

Theoretical determination and comparison with experimental data for the amount of water produced by a proton exchange membrane fuel cell

Jorge Mario Trejos valencia¹, Juan Esteban Tibaquirá Giraldo¹

² Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
jorgem@utp.edu.co

Resumen— Este artículo resume el diseño, construcción y simulación de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (CCMIP), así como la validación de los resultados teóricos obtenidos frente a resultados experimentales relacionados con la cantidad de agua producida por ésta. Con las simulaciones se pudo visualizar el comportamiento de la celda de combustible bajo diferentes condiciones de operación. Una vez obtenida la celda de combustible físicamente, se procedió a efectuar mediciones de voltaje generado y corriente que circula por la celda. Dado que los resultados experimentales relacionados con la producción de agua no difieren mucho de los resultados teóricos, puede afirmarse que el trabajo desarrollado con esta celda de combustible constituye un aporte en el área del diseño y construcción de este tipo de dispositivos, sentándose las bases para futuros proyectos relacionados con CCMIP.

Palabras clave— Celda de combustible, Generación de potencia, Membrana de intercambio protónico, Producción de agua.

Abstract— This paper summarizes the design, construction and simulation of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) and validates the theoretical results against experimental results related to the amount of water produced by it. In the simulations could visualize the behavior of the fuel cell under various operating conditions. Once built the fuel cell, measurements of voltage and current flow generated by the cell were made. Because the experimental results related to the production of water are not much different from the theoretical results, we can say that the work of this fuel cell is a contribution in the area of design and construction of these devices, setting the basis for PEMFC future projects.

Key Words— Fuel Cell, Power Generation, Proton Exchange Membrane, Water Production.

I. INTRODUCCIÓN

Debido al creciente interés a nivel mundial en las energías alternativas, se hace necesario el estudio de la implementación de estas nuevas tecnologías en nuestro país para determinar los beneficios de éstas tanto en el aspecto económico como en

el energético. El grupo de investigación en gestión energética (Genergética) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira propuso este proyecto con el fin de familiarizar a la comunidad con las celdas de combustible de hidrógeno, que según el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) se impondrán en las próximas cuatro o cinco décadas como dispositivos para generar energía en aplicaciones estacionarias y móviles.

Agua y energía están intrínsecamente unidas. El agua es requerida por casi todos los organismos vivos así como también por muchos procesos industriales modernos incluyendo la generación de energía. La energía es usada para el tratamiento y transporte de agua y el agua es usada para el enfriamiento de centrales termoeléctricas, de esta forma, la energía contiene agua y el agua contiene energía [1]. Este proyecto se enfocó en la relación que existe entre la energía y el agua, producidas en una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico (CCMIP).

En un trabajo previo realizado por Arizona State University sobre la recuperación de agua de una CCMIP se concluyó que se podría crear un nuevo paradigma para la generación de energía y agua simultáneamente in situ [2]. En dicho trabajo se mostró que ningún estudio previo examinó los efectos de los diferentes parámetros de operación de la CCMIP sobre el agua generada.

Con el proyecto que se resume en este artículo se pretendió determinar teóricamente y hacer una comparación con datos experimentales de la cantidad de agua producida por una celda de combustible de membrana de intercambio protónico. Para tal fin, los objetivos específicos se enmarcaron en el diseño y construcción de una CCMIP, la determinación teórica de la cantidad de agua producida por ésta bajo diferentes condiciones de operación y la validación de los resultados teóricos (cantidad de agua producida) comparándolos con los resultados experimentales existentes de una celda de combustible de características similares.

La celda de combustible de membrana de intercambio protónico también llamada celda de combustible de polímero sólido (SPFC), fue desarrollada por General Electric en los Estados Unidos en la década de 1960 para uso de la NASA en sus primeros vehículos espaciales tripulados [3], [4], [5]. El electrolito es un polímero de iones de conducción. A cada lado de la membrana se une un electrodo poroso catalizado.

El ión móvil utilizado en los polímeros es un ión H^+ o protón, por lo que el funcionamiento básico de la celda es esencialmente el mismo que para la celda de combustible de electrolito ácido. Los electrolitos de polímero trabajan a bajas temperaturas, lo cual representa la ventaja de que una CCMIP puede comenzar a operar rápidamente. La delgadez de la membrana implica que las celdas de combustible se pueden hacer más compactas. Otras ventajas son que no hay riesgos de líquido corrosivo y que la celda puede funcionar en cualquier orientación. Esto significa que las CCMIP son apropiadas para uso en vehículos y en aplicaciones portátiles [6].

Desde el punto de vista de la eficiencia eléctrica, el proceso propio de una celda de combustible no está sujeto al límite de eficiencia de las máquinas térmicas definida por la *Ley de Carnot* [7], la cual está limitada por las temperaturas a las que el calor es suministrado y evacuado del sistema. Para máquinas térmicas, limitadas por dicho ciclo, la eficiencia máxima teórica puede encontrarse en un intervalo de 40 - 45%, aunque en la práctica se encuentre reducido a alrededor del 30%. La eficiencia de conversión de energía química en electricidad en una celda de combustible, podría ser teóricamente del 100%. Sin embargo, la eficiencia tal vez del 40% para la conversión de energía química en electricidad no depende de si la celda está trabajando a su máxima potencia o no [8].

II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE COMUSTIBLE

A. Montaje experimental

El montaje completo de la celda de combustible está compuesto por los elementos auxiliares del módulo y por la celda como tal. El diseño de estos elementos se llevó a cabo mediante el software *Solidworks*® [9]. La disposición final de la unión de todos estos elementos se aprecia en la Figura 1.

Una vez montada la celda de combustible, se procedió a realizar el ensamble final de ésta y los demás elementos constitutivos del montaje general, esto se logró ensamblando todos estos elementos en una estructura que sirve como soporte y cumple la función de fijar y transportar todo el montaje. Para tal efecto se decidió usar una estructura en acrílico de 10 mm de espesor, ya que ésta es liviana y muy resistente al impacto y a las temperaturas que puedan alcanzarse mientras la celda de combustible esté en operación.

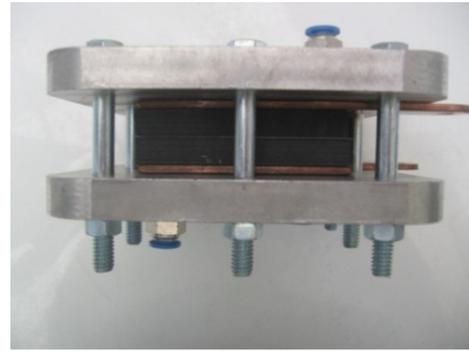


Fig. 1. Celda de combustible

Una vez definida la estequiometría de la celda de combustible y calculados los flujos volumétricos necesarios, se procede a hacer la selección de los elementos que hacen parte del montaje, como flujómetros, medidores de presión y cantidad de aire e hidrógeno a utilizar.

1. Flujómetros

Los flujómetros usados fueron montados usando tornillos e igualmente fue necesario hacer dos perforaciones para permitir la conexión de las mangueras con sus respectivos racores. Para la medición del caudal de aire se utilizó un flujómetro con escala de 3 a 20 SCFH y para la medición del caudal de hidrógeno se utilizó un flujómetro con escala de 0,5 a 5 SCFH.

2. Medidores de presión

Para medir la presión del aire y del hidrógeno que circula por la celda de combustible se utilizaron dos manómetros de glicerina con un rango de presión de 0 a 30 psi. Estos manómetros fueron montados en la parte superior de la estructura, se hicieron dos perforaciones del tamaño adecuado para insertarlos sobre ésta y se fijaron mediante dos piezas de acrílico. A cada uno de los manómetros fue conectado un racor en "T" de 1/4" con acoples rápidos para llevar el suministro de aire e hidrógeno a través de éstos.

3. Suministro de aire e hidrógeno

El aire y el hidrógeno que alimentan la celda de combustible son suministrados por dos cilindros de 6,5 m³ y 6 m³ respectivamente los cuales, por razones de seguridad, fueron ubicados a una distancia de aproximadamente 10 m de la celda de combustible. Dichos cilindros van conectados con su respectivo regulador de presión, con sus respectivos adaptadores y acoplados a éstos las líneas de suministro (manguera de teflón de 1/4") que van directamente hasta las entradas de la celda de combustible. Para suministrar el aire y el hidrógeno a la celda de combustible, se utilizó manguera de teflón de 1/4" y para hacer las conexiones de éstas se utilizaron racores rápidos de 1/4" x 1/4" NPT.

4. Carga de la celda de combustible

La operación de la celda de combustible, es decir, la corriente que se va a generar, debe ir regulada por una carga; por tal motivo es necesario contar con un circuito electrónico que cumpla con esta función. Los componentes electrónicos que hacen parte del circuito fueron ensamblados sobre una placa de bakelita de 15 cm x 10 cm, a ésta última se le unió una placa de aluminio de 20 cm x 10 cm por medio de tornillos, que sirvió como disipador de calor, y a su vez sobre ésta placa se montó un ventilador axial para complementar la función de enfriamiento.

B. Ensamble final

En la Figura 2 se muestra el banco de pruebas acoplado a las líneas de suministro, a la fuente de poder y a los medidores de corriente y voltaje, montado todo sobre una estructura móvil.



Fig. 2. Banco de pruebas de la celda de combustible

C. Modelado

Como complemento a los resultados teóricos, se utilizó el programa computacional *EES*[®] [10] para establecer un modelo con el cual se pudieran simular las condiciones de operación de la celda de combustible y obtener resultados como los flujos de hidrógeno, aire y agua, el voltaje máximo, la eficiencia máxima de la celda y algunos parámetros concernientes al manejo del agua dentro de la celda. Se llevó a cabo la simulación de la celda de combustible para tres casos distintos de operación:

- Sin humidificación
- Con humidificación de ambos flujos (hidrógeno y aire)
- Con humidificación del aire atmosférico

En los tres casos se analizó la variación de la cantidad de agua producida por la celda de combustible en función de la corriente que circula por ésta. Estas simulaciones se basaron en cálculos analíticos que previamente fueron estudiados por [11] y fundamentados en el trabajo de [12].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la variación de los diferentes parámetros que caracterizan el funcionamiento de la celda de combustible; éstos fueron obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el software *EES*[®]. Los cálculos en los que se tiene en cuenta la humidificación, se relacionan con la humedad contenida en las corrientes de hidrógeno y de aire. La humidificación en los resultados experimentales se relaciona con el agua desionizada que se inyectó externamente en la celda de combustible, ya que ésta no produjo agua para llevar a cabo su propia humidificación.

A. Variación del flujo de agua sin humidificación y con humidificación

En la Figura 3 se muestra la variación del flujo de agua que se produce en la celda cuando la corriente varía desde 1 hasta 50 amperios, sin humidificación y con humidificación de las corrientes de aire e hidrógeno. Los valores para el flujo de agua para los dos casos son tan cercanos, que esta variación se representa casi con la misma línea.

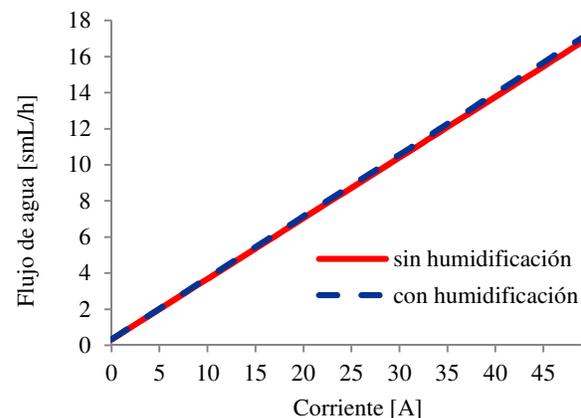


Fig. 3. Variación del flujo de agua producida con respecto a la corriente, sin humidificación y con humidificación de los flujos de aire e hidrógeno

Después de observar la gráfica anterior, se puede afirmar que la variación del flujo de agua producida por la celda de combustible con o sin humidificación de los reactivos es mínima con respecto a la corriente que circula por la celda. Esto se debe a que la cantidad de agua presente en los reactivos al igual que su comportamiento, no son influenciados de manera importante por la corriente producida por la celda; dicha cantidad de agua se ve modificada por otros parámetros. El comportamiento lineal de esta gráfica se debe a la poca dependencia existente entre estas dos variables.

B. Variación del flujo de aire y de hidrógeno

Se observó la variación del flujo de aire y de hidrógeno con respecto a la corriente. En la Figura 4 se representa esta variación.

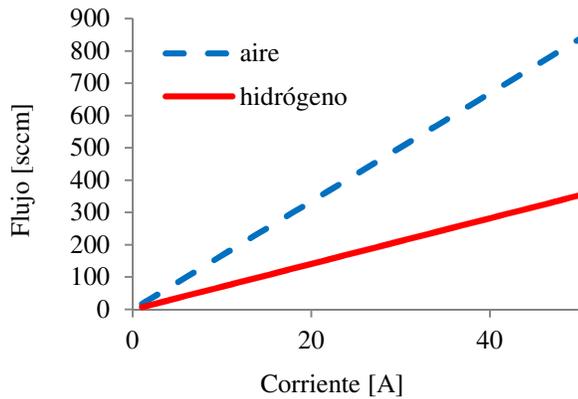


Fig. 4. Flujo de aire y de hidrógeno con respecto a la variación de la corriente

La gráfica anterior puede ser interpretada en el sentido de qué tanta corriente se produce cuando por la celda de combustible fluye determinada cantidad de aire e hidrógeno. Se observa que para obtener determinada valor de corriente se requiere una cantidad de aire mayor que de hidrógeno y cada vez que aumenta el requerimiento de corriente, la diferencia entre los dos flujos es mayor. La estequiometría de la reacción que se da en la celda de combustible puede explicar este comportamiento.

C. Flujo de aire con agua y flujo de hidrógeno con agua con respecto a la temperatura de humidificación de la celda

La temperatura de humidificación afecta la cantidad de agua presente en las corrientes de aire y de hidrógeno. En la Figura 5 se aprecia la relación entre estos parámetros.

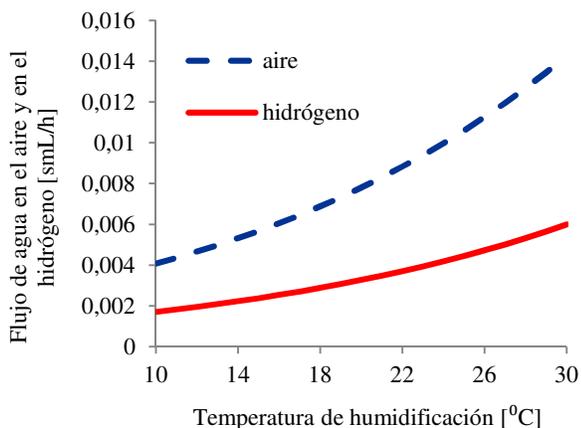


Fig. 5. Flujo de agua en el aire y en el hidrógeno con respecto a la temperatura de humidificación

La presión de saturación depende de la temperatura de saturación, lo que a su vez indica que los flujos de agua en el

aire y de agua en el hidrógeno están influenciados por el valor de esta temperatura. Lo anterior es claro si se observan las ecuaciones correspondientes a dicho numeral en donde se puede ver que la cantidad de agua presente en ambas corrientes depende de la presión de saturación. El rango para las temperaturas de saturación elegido corresponde a valores típicos que se utilizan en las CCMIP.

D. Variación del flujo de agua en el aire y en el hidrógeno con respecto a la presión

La cantidad de agua en el flujo de aire y de agua en el hidrógeno varía con respecto a la presión de suministro de cada corriente. En la Figura 6 se muestra dicha variación.

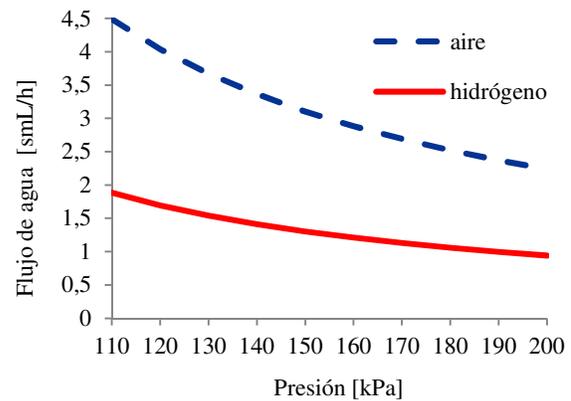


Fig. 6. Flujo de agua en el aire y en el hidrógeno con respecto a la presión

De acuerdo con las características de funcionamiento de una CCMIP, se hace evidente que cuando aumenta la presión del aire que ingresa a la celda, éste disminuye su capacidad para contener agua. Entonces, como el objetivo es producir potencia y éste se consigue con el aumento de presión, hay que tener cuidado de que este aumento no sea tan grande como para que la cantidad de agua contenida en el aire no disminuya tanto, afectando la operación de la celda. El mismo análisis se hace para el hidrógeno. Las diferencias de valores están basadas en la estequiometría del funcionamiento de la celda de combustible.

E. Variación del voltaje máximo y la eficiencia con respecto a la temperatura de la celda

En la Figura 7 se aprecia la relación entre el voltaje máximo que alcanza la celda y la eficiencia máxima obtenida, con respecto a la temperatura de operación de la celda.

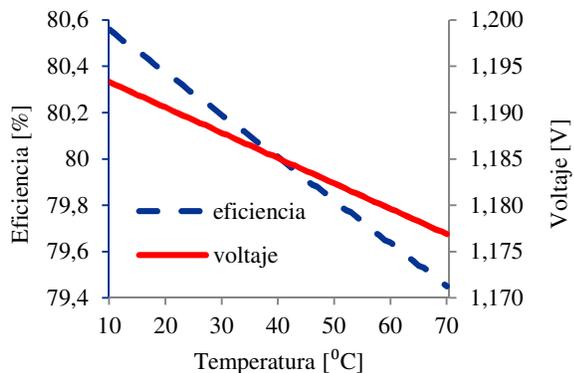


Fig. 7. Variación del voltaje máximo y la eficiencia máxima con respecto a la temperatura de la celda de combustible

La gráfica anterior muestra que resulta beneficioso que la temperatura de operación de la celda de combustible sea lo más baja posible para obtener eficiencias altas, esto se debe que cuando aumenta la temperatura de operación de la celda, se producen más pérdidas de energía, haciendo que menos cantidad de energía entregada por el aire y por el hidrógeno sea convertida en energía eléctrica. Con respecto al voltaje se hace la misma afirmación, ya que estos dos parámetros tienen una dependencia directa entre sí.

F. Variación del flujo de agua con o sin humidificación del aire atmosférico respecto a la corriente

En la Figura 8 se muestra la variación del flujo de agua que sale de la celda de combustible, teniendo en cuenta o no la humidificación del aire atmosférico con respecto a la variación de la corriente que circula a través de la celda de combustible. Se representa una sola línea porque los valores para el flujo de agua son casi los mismos para ambos casos.

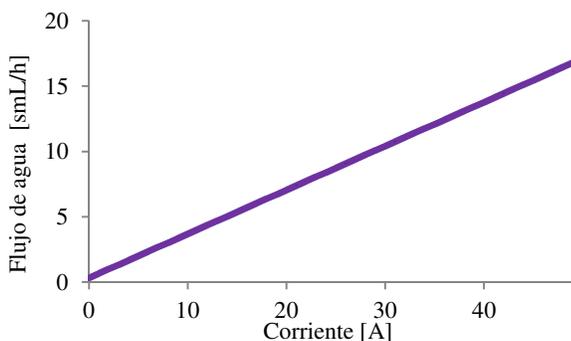


Fig. 8. Flujo de agua con respecto a la variación de la corriente, teniendo en cuenta o no la humedad del aire atmosférico

Se podría pensar que las condiciones externas también afectan el comportamiento de la celda de combustible; en la gráfica anterior se observa que la humidificación del aire exterior afecta muy poco o nada la producción de agua de la celda con respecto a la corriente que circula por ésta. Esto se debe a que las condiciones de operación internas de la celda de combustible predominan sobre las condiciones externas. La

gráfica presenta entonces un comportamiento similar al de la gráfica de la Figura 4.

G. Variación de la temperatura de bulbo seco, de la humedad específica y del flujo de agua con respecto a la humedad relativa

Algunas variables relacionadas con las corrientes de flujo que pasan a través de la celda de combustible, como la temperatura de bulbo seco, la humedad específica y el flujo de agua varían con el cambio de la humedad relativa del aire. En las Figuras 9 y 10 se aprecia esta variación gráficamente.

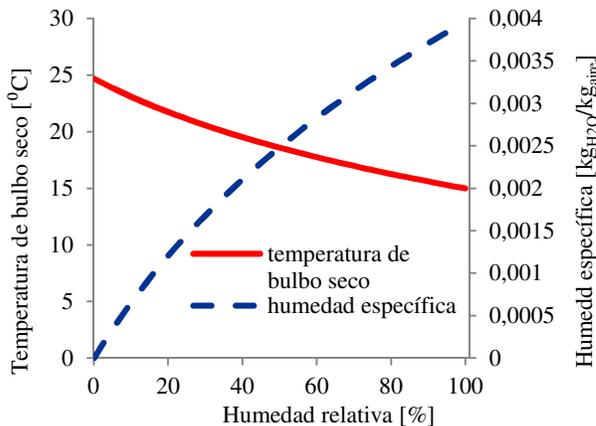


Fig. 9. Temperatura de bulbo seco y humedad específica con respecto a la humedad relativa del aire

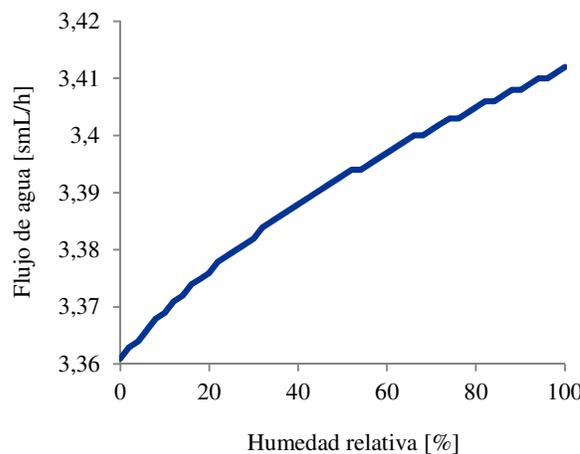


Fig. 10. Flujo de agua con respecto a la humedad relativa

El comportamiento de las gráficas anteriores se explica observando las ecuaciones correspondientes a la psicrometría del aire, en las que es evidente que la humedad relativa hace que la humedad específica aumente y la temperatura de bulbo seco disminuya, es válido aplicar estas relaciones al funcionamiento de una CCMIP. Además se observa que el flujo de agua aumenta de manera proporcional, pero no lineal con respecto a la humedad relativa, debido a que este flujo depende también de la presión de operación de la celda de combustible.

H. Efecto de la humidificación. Comparación de los datos experimentales con los datos teóricos

El paso a seguir es la confrontación de los resultados teóricos relacionados con la producción de agua, con los resultados obtenidos experimentalmente. Es importante precisar que la celda de combustible construida no produjo agua por diversos motivos. En este sentido, se recurrió a los resultados obtenidos de una celda de combustible con características y condiciones de operación similares. Estos resultados fueron tomados del trabajo realizado por [11] y en el que se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando agua desionizada como

fente de humidificación, con una membrana N-212 con humidificación y después sin humidificación usando placas bipolares de grafito. Para un área activa de 25 cm², se varió la corriente desde 2,5 A hasta 25 A, obteniéndose valores para la densidad de corriente desde 0,1 A/cm² hasta 1 A/cm² respectivamente. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

En las Figuras 11 y 12 se muestra gráficamente la relación entre los resultados teóricos y los experimentales para la producción de agua en función de la densidad de corriente usando la membrana con y sin humidificación.

Corriente [A]	Densidad de corriente [A/cm ²]	Tasa de recolección de agua [smL/h]			
		Datos experimentales		Datos teóricos	
		Con humidificación	Sin humidificación	Con humidificación	Sin humidificación
2,5	0,1	3	*	1,03	0,84
5	0,2	3,47	*	2,06	1,68
7,5	0,3	3,86	*	3,08	2,52
10	0,4	4,51	2,4	4,11	3,36
12,5	0,5	5,37	2,9	5,14	4,2
15	0,6	5,78	3,8	6,17	5,04
17,5	0,7	7,39	3,3	7,2	5,88
20	0,8	7,92	5,3	8,22	6,72
22,5	0,9	9,02	*	9,25	7,56
25	1	10,05	*	10,28	8,4

Tabla 1. Variación de la producción de agua con respecto a la densidad de corriente (*Dato no disponible).

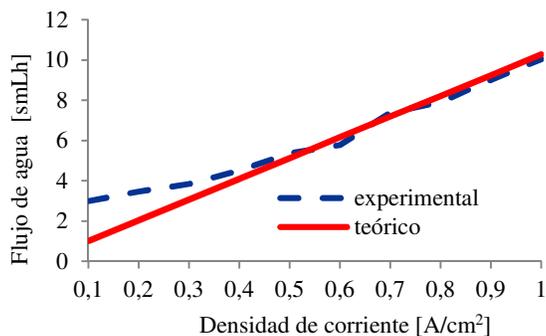


Fig. 11. Producción de agua en función de la densidad de corriente, con humidificación

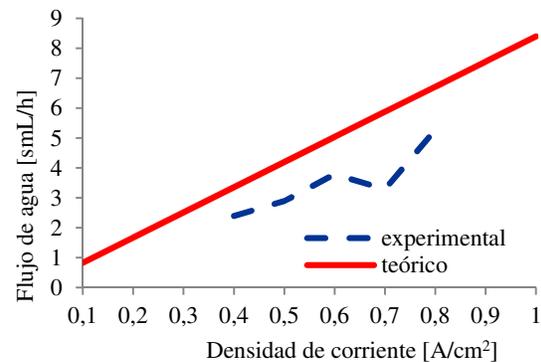


Fig. 12. Producción de agua en función de la densidad de corriente, sin humidificación

Las gráficas anteriores sugieren que la densidad de corriente (por lo tanto la corriente), como ya se había observado, hace que la producción de agua en la celda de combustible aumente. Pero lo importante en este caso es el análisis de estos parámetros con relación a los resultados experimentales confrontados con los resultados teóricos.

En el primer caso, en el que se considera la humidificación de la membrana se observa que el comportamiento real no es muy distante del comportamiento teórico (una línea recta); al principio, con bajas densidades de corriente las dos curvas son muy distantes entre sí, pero a medida que la corriente va aumentando, la curva experimental se va acercando cada vez más a la teórica hasta que ambas curvas alcanzan un comportamiento muy similar. En este orden de ideas, se puede afirmar que la humidificación de la membrana es un buen método para que una CCMIP produzca un flujo de agua cada vez mayor cuando se aumenta la corriente que circula por ésta [13].

La segunda gráfica muestra que el comportamiento entre las dos curvas es un poco más distante que en el primer caso. No se cuenta con la totalidad de los datos para la prueba experimental correspondiente a este caso, sin embargo los datos disponibles son suficientes para concluir que cuando no se humidifica la membrana, la producción de agua no es tan buena como debería serlo en teoría.

I. Medición de corriente y voltaje

Se realizaron 10 pruebas en las que se midió el voltaje producido por la celda y la corriente que circulaba por ésta. Dichas pruebas se llevaron a cabo mientras existió suministro de aire e hidrógeno. La presión al inicio de las pruebas en ambos tanques era de 40 psi, hasta 0 psi al final de ellas. En la Tabla 2 se muestran de manera resumida las mediciones llevadas a cabo para el voltaje y la corriente.

Prueba No	Corriente (A)	Voltaje (V)
1	1.08	0.60
2	1.12	0.56
3	1.02	0.52
4	1.16	0.56
5	1.21	0.40
6	1.08	0.46
7	1.12	0.47
8	1.09	0.51
9	1.11	0.61
10	1.12	0.47

Tabla 2. Resultados para la medición de voltaje y corriente en la celda de combustible

IV. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la confrontación de los resultados teóricos frente a los que ofrece la experimentación, recurriéndose a los resultados obtenidos de una celda de combustible de características similares a la diseñada y construida en este trabajo. Sin embargo se concluye que los resultados obtenidos con los cálculos teóricos explican de manera satisfactoria el comportamiento real de una CCMIP.

Dado que las placas bipolares son uno de los principales elementos constitutivos de la celda de combustible, es importante realizar un buen diseño de éstas, es decir, elegir una configuración adecuada de los canales de flujo con el fin de que la distribución de los gases sea eficiente. Además se recomienda que estén recubiertos por un material catalizador, que puede ser el platino o el paladio, para lograr una eficiencia más alta.

La humidificación de los gases es uno de los aspectos clave en la operación de una CCMIP, por tal motivo se recomienda hacer varios ensayos poniendo atención a la humedad del aire utilizado como reactivo y a la humidificación directa de la celda, o sea, la inyección de agua ionizada al interior de ésta.

La etapa de modelado del presente trabajo permitió visualizar de manera clara el funcionamiento de la celda de combustible mostrando principalmente la relación entre la producción de agua y otros parámetros de operación, concluyéndose que es posible variar la cantidad de agua producida en tanto se tenga control de parámetros como la corriente y el voltaje que circulan por la celda, la temperatura y presión de operación y la temperatura de humidificación. También influyen parámetros que no son tan fáciles de controlar, como la humedad relativa del aire. Los resultados allí mostrados permitirán sentar las bases para realizar trabajos posteriores con la celda de combustible construida.

RECOMENDACIONES

Las celdas de combustible son dispositivos muy sensibles a su modo de fabricación, por eso es necesario tener cuidado en la selección de los materiales y en el montaje de los elementos que conforman la celda.

Dado que las placas bipolares son uno de los principales elementos constitutivos de la celda de combustible, es importante realizar un buen diseño de estos elementos, es decir elegir una configuración adecuada de los canales de flujo con el fin de que la distribución de los gases sea eficiente. Además se recomienda que estén recubiertos por un material catalizador, que puede ser el platino o el paladio, para lograr una eficiencia más alta.

La humidificación de los gases es uno de los aspectos clave en la operación de una celda de combustible tipo MIP, es por eso que se recomienda hacer varios ensayos poniendo atención a la humedad del aire utilizado como reactivo y a la humidificación directa de la celda, o sea, la inyección de agua ionizada al interior de ésta.

Es necesario controlar la temperatura de la celda; en lo posible ésta debe tener la misma distribución de temperatura a través de todo el sistema, con el fin de evitar la fatiga térmica de los materiales, lo que conllevaría a la destrucción de la membrana y demás elementos de la celda. El control de flujo de los reactivos es importante. La relación del flujo de aire al flujo de hidrógeno debe mantenerse constante para que la celda funcione de manera eficiente.

Durante la unión de los elementos de la celda de combustible, hay que asegurarse que no existan fugas de gases, debido a esto es necesario tener cuidado de que los empaques estén fabricados en el material y el calibre adecuado. Además la correcta alineación y ajuste de dichos elementos es fundamental para evitar este inconveniente.

Como es sabido, en el montaje de la celda de combustible intervienen elementos eléctricos, por eso es importante hacer las conexiones eléctricas de manera correcta para evitar corto circuitos u otros percances. Es importante que cuando se vaya a operar la celda de combustible, se haga en espacios abiertos o por lo menos bien ventilados, ya que en este montaje interviene un flujo de hidrógeno y están presentes elementos eléctricos.

A partir del trabajo realizado con esta celda de combustible quedan sentadas las bases para realizar futuras investigaciones con las que se puedan obtener otros resultados relacionados con la producción de agua. Específicamente se pueden realizar trabajos que impliquen el diseño de placas bipolares con otras configuraciones, la humidificación y el control de la presión y la temperatura.

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira sin cuya financiación no hubiera sido posible el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Gleick P., *Water and energy*. Environmental Energy Annual Reviews 1994; 19:32.
- [2] Hristovski K., Dhanasekaran B., Tibaquirá J., Posner J., & Westerhoff P. Producing drinking water from hydrogen fuel cells. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*. 2009; 58.5:327-335.
- [3] Warshay M., Prokopius P.R., The fuel cell in space: yesterday, today and tomorrow. *Journal of Power Sources*. 1990; 29:193-200.
- [4] Orta, D., Mudgett, P.D., Ding, L., Drybread, M., Schultz, J.R., & Sauer, R.L. Analysis of water from the Space Shuttle and Mir Space Station by ion chromatography and capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 804(1-2), 295 - 304. 1998.
- [5] Richard, L.S., & David, J.C. *Apollo Experience report potable water system*. Rep. No. LC-75-600030; NASA-SP-368, National Aeronautics and Space Administration. USA, 1973.
- [6] Larminie J., *Fuel Cell Systems Explained*. U.K: John Wiley & Sons Ltd; 2003.
- [7] Lineo F., *Controller fuel cell module using Labview software tool* [disertación]. Santiago, Chile: Universidad de Chile; 2004.
- [8] Twidell J., *Renewable Energy Resources*. USA: E. & F. N. Spon; 1986.
- [9] Solidworks Corporation. Available at: <<http://www.solidworks.com>>.
- [10] EES, Engineering Equation Solver. Commercial Version 6883-3D. 1992-2003. Inc. Klein. Disponible en: <<http://www.fchart.com/ees/>>.
- [11] Tibaquirá J., *Reclaiming Water From Energy Generation Technologies* [disertación]. Arizona, USA: Arizona State University; 2010.
- [12] Janssen G., Overvelde M. Water transport in the proton-exchange membrane fuel cell: measurements of the Effective drag coefficient. *Journal of Power Sources*. 2001; 101:117-125.
- [13] Collier, A., Wang, H.J., Yuan, X.Z. Zhang, J.J., & Wilkinson, D.P. Degradation of polymer electrolyte membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1838 - 1854. 2006.
- [14] Tibaquirá, J. *Reclaiming Water From Energy Generation Technologies*. Disertación doctoral, Arizona State University, Arizona, USA, 2010.
- [15] Tibaquirá J., Hristovski K., Westerhoff P., & Posner J. Recovery and quality of water produced by commercial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011; 36: 4022-4028.
- [16] Tibaquirá J., Hristovski K., Westerhoff P., & Posner J. Water quality and yield from polymer electrolyte membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011; 36: 13022-13031.
- [17] Catálogo Dwyer. Disponible en: http://www.dwyer-inst.com/pdf_files/E-60-M_lit.pdf. 2010.