



**TRANSPORTE DE MASA EN UNA PILA A COMBUSTIBLE TIPO PEMFC UTILIZANDO COMBINACIONES DE PLATOS MONOPOLARES Y MEDIOS DE DIFUSION DE REACTIVOS.**

M. G. Araceli Rosas Paleta<sup>1</sup>, C. Moisés Bautista Rodríguez<sup>2\*</sup>, J. Antonio Rivera Marquez<sup>1</sup>, Nancy Tepale Ochoa<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> BUAP. Facultad de Ingeniería Química. Av. San Claudio y 18 Sur - CU. CP. 72590 Puebla, Puebla.

<sup>2</sup> Alter-Energías Grupo. Tepetitlán No. 63, Col. Lomas del Sur. CP 72470 Puebla, Puebla.

\* Domicilio Actual del Autor correspondiente: UHDE Engineering de México S.A. Av. Paseo las Palmas No. 405. CP. 11000 Lomas de Chapultepec México DF. Tel. (55) 5284 0200 Ext. 8036. E-Mail: [celso.bautista@thyssenkrupp.com](mailto:celso.bautista@thyssenkrupp.com)

**RESUMEN**

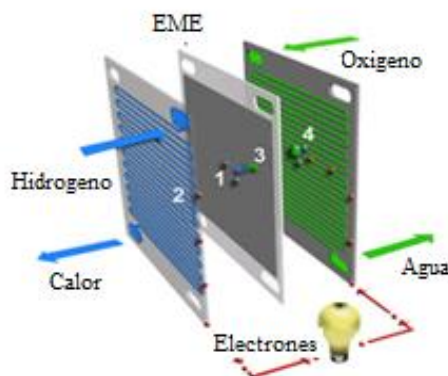
La eficiencia de una pila a combustible tipo PEMFC es limitada por diversos fenómenos de transporte de masa presentes durante su funcionamiento. La fuerza electromotriz de la pila a combustible tipo PEM está relacionada con la generación de gradientes de concentración los cuales se dan como resultado de la distribución de los reactivos sobre los sitios activos del electrodo. Los gases reactivos suministrados a una PEMFC se distribuyen sobre la capa de difusión de los electrodos por medio de los canales de las placas polares, posteriormente difunden hacia la capa activa donde se llevan a cabo las semi-reacciones. Otro aspecto importante es la presencia de las moléculas de agua, producto de la reacción, que al acumularse cubren la porosidad de los electrodos implicando la reducción del flujo de los reactivos, incluso a altos valores de densidad de corriente se combina con los fenómenos de difusión involucrados, ocasionando; el cese total en el funcionamiento de la PEMFC. Los parámetros críticos para los fenómenos de transporte son la porosidad, el diámetro del poro en la capa de difusión y las características de distribución de reactivos. El presente trabajo comprende un diseño experimental entre dos medios de distribución y dos medios de difusión de gases reactivos en una PEMFC, implicando tres casos de estudio. Los resultados obtenidos muestran interacciones notablemente significativas entre el diámetro de poro, el tipo de capa de difusión aplicada y el tipo de distribuidor aplicado. La combinación en el segundo caso reduce significativamente las resistencias óhmicas y moderadamente las resistencias por difusión mientras la combinación del caso tres incrementa notablemente las resistencias óhmicas sin embargo reducen las resistencias por difusión de forma importante.

**Palabras Clave:** PEMFC, Distribuidor polar, Transporte de Masa, Difusión de Reactivos, Electrodos Porosos.

### 1. INTRODUCCIÓN

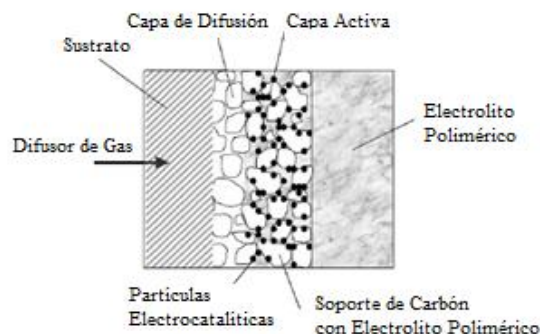
En la actualidad, la adquisición de energía para satisfacer las necesidades del hombre proviene de la quema de combustibles fósiles, lo que ha provocado graves problemas ambientales. Adicionalmente, el exceso en la explotación de recursos naturales por la sociedad mundial ha ocasionado que se encuentren en peligro de extinción. Una alternativa viable es reemplazar la obtención de energía eléctrica desarrollando nuevas tecnologías limpias y eficientes que permitan generarla y almacenarla. Una respuesta a la problemática para generar energía eléctrica son las pilas a combustible con membrana a intercambio protónico (PEMFC). Esta tecnología retoma su interés a principios del tercer milenio como una alternativa eficiente para minimizar la explotación de los recursos naturales, debido a que las pilas a combustible tipo (PEMFC) ofrece tasa cero de contaminación y altos rendimientos energéticos, normalmente utiliza Hidrógeno como combustible y Oxígeno como comburente, operando a temperaturas máximas reportadas a 120°C y presiones en el intervalo de 1 a 5 atmósferas.

Una pila a combustible tipo PEMFC es un dispositivo electro-químico que convierte la energía química de la reacción de hidrólisis inversa transformándola directamente en energía eléctrica, teniendo solo agua como producto de reacción y desecho, desprendiendo una cantidad de calor.<sup>1-2, 4-7</sup>. Así, una monocelda PEMFC (Figura 1) está constituida por; una membrana conductora de protones pero no de electrones (comúnmente Nafion), los electrodos tipo poroso (ánodo y cátodo) con carga catalítica (normalmente Platino), los platos polares ó placas de distribución (grafito ó metal) y los soportes mecánicos. Fundamentalmente, el principio de funcionamiento de la PEMFC se centra en los electrodos y en el electrolito, elementos ensamblados por termo-presión en el orden Electrodo-Membrana-Electrodo (EME) y se ubican entre los platos polares.<sup>3, 8</sup>.



**Figura 1.** Esquema de una pila a combustible tipo PEMFC.

Los electrodos comercialmente utilizados, son de tipo poroso y comúnmente están constituidos en tres etapas (Figura 2): i) la capa de difusión la cual está formada por aglomerados de carbón con alguna resina conductiva como aglutinante, ii) una tela de carbón ó PTFE es utilizada en la segunda etapa como soporte mecánico flexible y iii) la capa activa, la cual está formada por aglomerados de carbón con carga catalítica (normalmente Platino) y film Nafion como aglutinante.



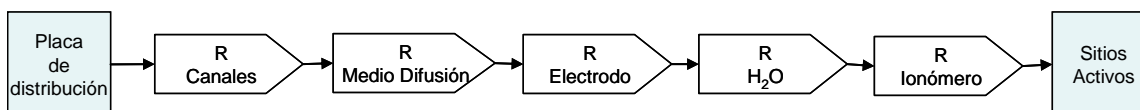
**Figura 2.** Esquemático de un electrodo poroso utilizado en PEMFC.

Una mayor eficiencia en la PEMFC se encuentra limitada por diversos fenómenos cinéticos y de transporte, como son: i) la cinética electroquímica, de forma precisa la reacción de reducción de oxígeno, ii) el transporte de materia; difusión de especies ( $H_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  si se utiliza aire) en fase gas por los poros de los electrodos, así como la disolución de especies en la membrana electrolítica, además la migración de especies iónicas ( $H^+$ ) y electrónicas ( $e^-$ ), finalmente iii) la gestión del agua producto de la reacción.<sup>2, 9-13</sup>

El desempeño de la pila PEMFC se ve limitada por la cinética electroquímica, el transporte de los protones a través de la membrana, las resistencias eléctricas (ohmicas) y el transporte de masa. Los problemas típicos en una PEMFC ocasionados por los fenómenos de transporte, se clasifican en cuatro categorías: i) inundación por agua o presencia de agua líquida atrapada en los electrodos, ocasionando interrupción en el flujo de gases y especies de reacción; ii) dilución de la concentración del oxidante (cuando se utiliza el oxígeno del aire); iii) gradientes de concentración de reactivos a lo largo de los canales de distribución en las placas polares; iv) distribución de reactivos no uniforme sobre la capa activa de los electrodos debido a las condiciones mecánicas entre los canales de distribución y la capa difusiva, lo cual origina una distribución de corriente y potencial heterogéneo sobre el área del electrodo, siendo particularmente grave en dispositivos de gran superficie.<sup>14, 19</sup> La inundación por agua es la principal causa de caídas en el desempeño de la PEMFC a

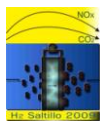
altas densidades de corriente, debido a las barreras de transporte que ocasiona el agua líquida atrapada en los poros de los electrodos, estas barreras llegan a ocasionar zonas muertas sobre el área activa de los electrodos reduciendo el área de reacción efectiva. Por otra parte, el uso de oxígeno del aire como comburente representa una dilución en la concentración de oxígeno en el flujo de gas debido a su consumo constante, desarrollando una baja presión parcial de oxígeno, lo cual reduce la reacción de reducción de oxígeno e impacta la eficiencia y la potencia desarrollada por la PEMFC. Finalmente, el diseño ineficaz de campos de flujo para los gases reactivos, puede provocar una disminución en la utilización de los reactivos y un ineficiente sistema de drenado de productos, ambos factores reducirán el área activa del electrodo por generación de gradientes de concentración.<sup>5-16, 20</sup>

Un modelo para medir la resistencia al transporte de masa ha sido propuesto por Beuscher.<sup>21</sup> El modelo propone que la resistencia total al transporte está compuesta por diversas resistencias en serie (Figura 3). Los resultados muestran que menos del 50% de la resistencia total al transporte de masa se debe a la suma de las resistencias en: los canales de distribución, el medio de difusión de gas (capa de difusión) y la capa activa de los electrodos. Además, describe gradientes de concentración de gases reactivos a través del medio difusivo, lo cual genera una distribución heterogénea sobre la capa activa de los electrodos. Otro factor importante es la longitud de la capa de difusión la cual depende del espesor del difusor, del canal y su ancho; lo que representa el 19% de la resistencia total, esto significa que el difusor aporta solo una parte de la resistencia al transporte de masa.



**Figura 3.** Esquema de resistencias al transporte de masa en serie para la difusión<sup>21</sup>

La eficiencia del transporte de los gases reactivos depende de varios factores. Dutta y colaboradores han propuesto un modelo matemático tridimensional para entender el flujo del gas y el transporte de los mismos, los factores que considera son: la capa de difusión, el diseño del canal y el ancho del mismo. Los pronósticos de este estudio muestran que la capa de difusión crea una menor y más uniforme densidad de corriente considerando otros casos que carecen de la misma, el diseño del canal permite una distribución adecuada del agua en el ánodo y cátodo y la migración de los gases a la entrada y el agua a la salida están en función del ancho del canal.<sup>23</sup> Las pérdidas óhmicas entre las placas y el EME reducen de manera significativa el desempeño de la pila, estas pérdidas se producen a nivel de las partículas catalíticas. Por otra parte, Bultel y



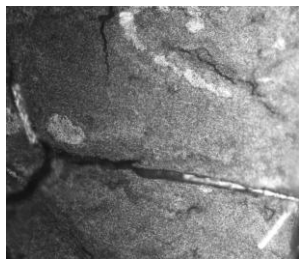
colaboradores proponen un modelo que permite disminuir el espesor de la capa activa y por lo tanto también disminuye la cantidad de catalizador en la capa activa para reducir las pérdidas óhmicas y las limitaciones de la capa de difusión.

En el medio difusivo se presentan resistencias al transporte debido a: el tamaño de poro, el cual se define a partir de los datos particulares para cada estudio, los resultados de Kong y colaboradores, hacen estudios de difusión, mencionando los tres tipos de poros; los macroporos presentan un diámetro aproximado de 5-20  $\mu\text{m}$  los cuales permiten la disminución de la tensión de la pila a altas densidades de corriente lo que sugiere un tamaño de macroporo óptimo, ellos encontraron un rango entre 5 y 10  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro el cual se obtuvo después de un tratamiento ácido y utilizando  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , los resultados permiten observar un mejor desarrollo del electrodo y por lo consiguiente el desempeño de la pila. Los microporos cuentan con diámetro aproximado de 0.03-0.06  $\mu\text{m}$  y en los mesoporos el diámetro aproximado es de 0.06-5  $\mu\text{m}$ .<sup>15</sup> Knudsen establece que la difusión de agua en los poros de menor tamaño entrapa los sitios activos y quedan cerrados a cualquier transporte lo que presenta un desempeño no óptimo de la pila.<sup>21</sup> En el presente trabajo se compara un diseño PEMFC convencional y un distribuidor de gases reactivos de tipo poroso como placa monopolar con el propósito de conocer su efecto sobre el funcionamiento de una PEMFC, principalmente a altas densidades de corriente.

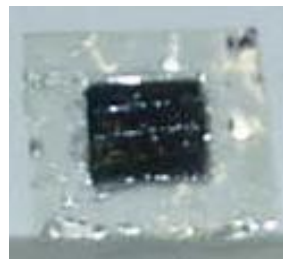
## 2. EXPERIMENTAL.

### 2.1 Diseño en Serpentin.

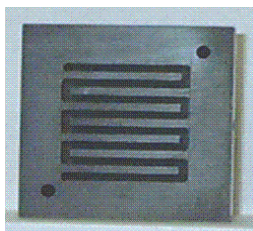
La preparación del primer ensamble electrodo-membrana-electrodo (EME) para la pila PEMFC se constituye de electrodos comerciales E-TEK (figura 4), los principales componentes de este electrodo son: i) una tela de carbón, la cual proporciona resistencia mecánica y conductividad eléctrica, su espesor es de 0.26 mm y la densidad es 0.49  $\text{g}/\text{cm}^3$ , ii) contiene polvos de carbón tipo Vulcan XC-72, iii) una película de Nafion® equivalente a 0.7  $\text{mg}/\text{cm}^2$  ó contenido de PTFE del 20%.<sup>9, 16, 23, 24</sup> y iv) una carga de catalizador en este caso platino (Pt) de 0.4  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Para caracterizar la pila se utiliza el ensamble que se presenta en la figura 5 y un par de placas polares manufacturadas en grafito con diseño de serpentín (Figura 6). Para la obtención de la microscopía óptica se utilizó un microscopio NIKON ECLIPSE MA 100 con una cámara digital Sigmy Ds-Fi 1, y aumentos de 20 X 0.45 y 50 X 0.8.



**Figura 4.** Capa de difusión Electrodo E-TEK. con aumento de (20 X 0.45).



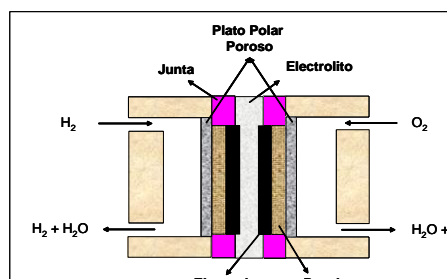
**Figura 5.** Presenta el ensamble de electrodos E-TEK.



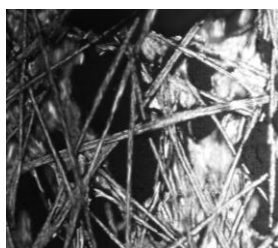
**Figura 6.** Placa monopolar con diseño en serpentín.

## 2.2 Diseño experimental

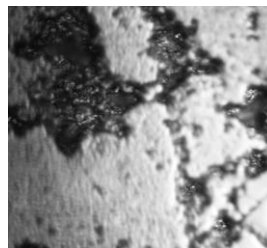
Este dispositivo combina un medio poroso (Figura 7) en grafito comercial como distribuidor de gases reactivos con la aplicación de papel grafitado (toray paper TGPH-090) como medio difusivo sobre el funcionamiento de una PEMFC, aplicando en forma común un ensamble a membrana con recubrimiento catalítico (EMRC) como electrodo. Este tipo de electrodos son desarrollados por el Departamento de Química del CINVESTAV, en el ánodo se utiliza  $0.8 \text{ mg/cm}^2$  de catalizador (platino), en 10% en peso de carbón (E-TEK), en ambos casos se utiliza papel grafitado (Figura 8) además utilizan una tinta preparada con 2.5 mg de platino (E-TEK), mezclada con 1 mg de carbón en polvo (Vulcan XC-72, Cabot) en una solución al 5% de etanol en Nafion® líquida, la solución se *esprea* con aire comprimido sobre la membrana Nafion®, distribuyéndose uniformemente sobre el área determinada y el ensamble se somete a termopresión<sup>25</sup>. La carga de Nafion y catalizador solo se presentan en la capa activa (en contacto con el electrolito).



**Figura 7.** Esquema de la PEMFC experimental.



**Figura 8.** Papel Grafitado, con aumento de (20 X 0.45).



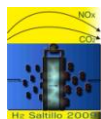
**Figura 9.** Distribuidor poroso en grafito, con un aumento de (50 X 0.8).

El área activa utilizada corresponde a 2 cm<sup>2</sup> (1.414 x 1.414 cm). Las membranas electrolíticas utilizadas son Nafion® 115 y Nafion® 112 con espesores aproximadamente de 100 µm y 50.8 µm respectivamente, 3, 9, 10. El área de electrolito utilizado es de 25 cm<sup>2</sup> (5 x 5 cm). El gas combustible alimentado a la PEMFC fue de alta pureza (H<sub>2</sub>, 99% Infra), así como el oxidante (O<sub>2</sub>, 99% Infra). La caracterización de las PEMFC se realizó en un banco de pruebas tipo "Fuel Cell Test System Globe Tech Compu-Cell GT-890-B. Las condiciones experimentales impuestos sobre la PEMFC para el presente estudio se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Condiciones de operación en la PEMFC para el estudio.

Variables (unidades)	Ánodo	Cátodo
Flujo de Gases (cc/min)	50	50
Presión (Psi)	4,5	5,10,14,15 y 20
Temperatura de Humidificación (°C)	35	35
Temperatura de la Pila (°C)	Ambiente	Ambiente





## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

En estudios anteriores<sup>22</sup> se ha reportado que el material para las placas polares puede ser de metal o grafito no poroso, los cuales deben poseer; una conductividad eléctrica suficiente, soportar el ensamble (EME) y proveer el transporte de los gases dentro de la pila mediante un diseño adecuado de los canales. Los distribuidores de gas se presentan en la figura 9. El material utilizado para este medio fue grafito sometido a temperaturas moderadas (600°C) con las siguientes características, su porosidad permite el transporte de los gases reactivos directamente a los sitios activos de los electrodos además permite remover el agua y, presenta resistencia a la corrosión. En la tabla 2 se presentan los casos de estudio para este trabajo.

**Tabla 2.** Diseño Experimental para el estudio.

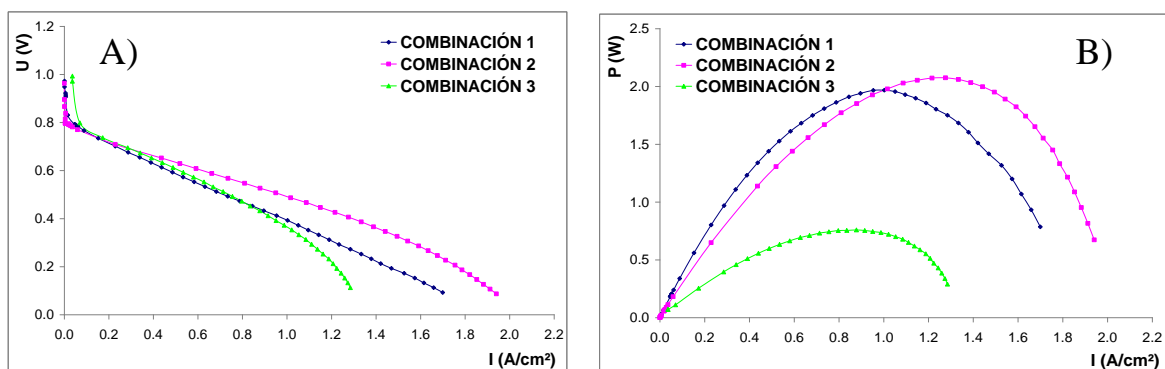
	Combinación 1	Combinación 2	Combinación 3
<b>Distribuidor</b>	Difusor de Grafito	Placas polares (Serpentín)	Placas polares (Serpentín)
<b>Electrodos</b>	EMRC	EMRC	E-TEK
<b>Membrana</b>	112	112	115

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 10 A se observa un efecto de las diferentes combinaciones aplicadas para este estudio sobre la funcionalidad de la PEMFC a 10 psi de presión catódica. Es notable el incremento de la eficiencia de la pila cuando se aplica la combinación 2 en comparación con la combinación 1, efecto que puede explicarse por mejores condiciones en la difusión de los gases reactivos sobre los sitios activos de los electrodos. Por otra parte, son notables las interacciones de la funcionalidad en la PEMFC aplicando las placas polares (combinación 2) con el ensamble EMRC y la combinación 3 con electrodos E-TEK, en el primer caso se aprecia un incremento en la densidad de corriente a casi el doble alcanzado por el otro tipo de ensamble. El ensamble EMRC muestra la perdidas por activación alrededor de  $0.1 \text{ A/cm}^2$ , las perdidas óhmicas se encuentran en el intervalo de  $0.1$  a  $1.6 \text{ A/cm}^2$ , y la zona de difusión puede apreciarse a partir de  $1.6 \text{ A/cm}^2$ , esto puede ser atribuible a las características propias del papel grafitado. La figura también muestra el desempeño de la pila cuando trabaja con un medio de difusión como la placa difusora (combinación 1), la zona de activación se presenta alrededor de  $0.7 \text{ A/cm}^2$ , la zona de perdidas óhmicas se presenta entre  $0.7$  y  $1.4 \text{ A/cm}^2$ , la zona de difusión no se aprecia fácilmente debido a que la curva se presenta de forma lineal, esto puede ser atribuible a la forma de distribución de los gases a través del medio difusor de forma constante por medio del poro, además se observa la linealidad característica del macroporo de los resultados de Kong y colaboradores, sin embargo también se observan mayores pérdidas óhmicas las cuales pueden ser atribuibles al diámetro de poro. Para el caso de utilizar un ensamble con electrodos comerciales, la máxima densidad de

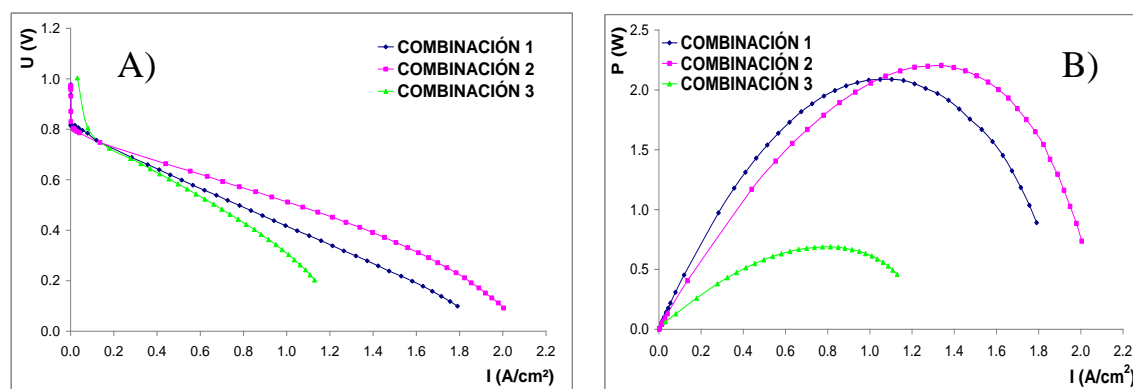


corriente se presenta en  $1.28 \text{ A/cm}^2$ , la zona de activación catalítica se presenta en  $0.17 \text{ A/cm}^2$ , las pérdidas óhmicas se pueden apreciar en el intervalo de  $0.17$  y  $1.05 \text{ A/cm}^2$ , y la zona de activación se observa a partir de  $1.05 \text{ A/cm}^2$ .



**Figura 10.** Funcionalidad de la curva I-U (A) y Potencia (B) para la PEMFC utilizando los diferentes medios de distribución y una presión de 10 psi: a) Combinación 1, b) Combinación 2 y c) Combinación 3.

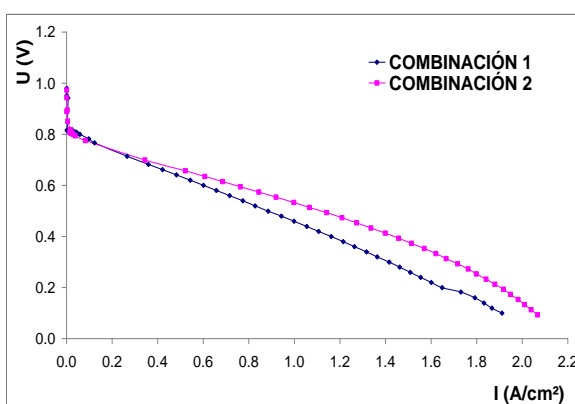
Las curvas de potencia correspondientes al caso antes descrito se presentan en la figura 10 B donde se observa un valor sobresaliente equivalente a  $2.07 \text{ W}$  para la combinación 2 Serpentín-EMRC en comparación con el Difusor-EMRC (combinación 1) y su homóloga Serpentín-E-TEK (combinación 3). La potencia mostrada por la combinación o el arreglo 2 muestra una ventaja de  $0.17 \text{ W}$  sobre los valores del arreglo 1, además estos dos arreglos muestran valores altos en comparación con los resultados obtenidos por el arreglo 3. En general se observa nuevamente un efecto de las condiciones en estudio sobre la funcionalidad de la PEMFC.



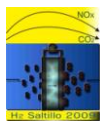
**Figura 11.** Funcionalidad de la curva I-U (A) y Potencia (B) para la PEMFC utilizando los diferentes medios de distribución y una presión de 15 psi: a) Combinación 1, b) Combinación 2 y c) Combinación 3.

La curva de funcionalidad de la PEMFC de los diferentes medios difusivos en estudio y 15 psi de presión catódica, se muestran en la figura 11 A dónde se observan cambios importantes. En la combinación 2 (Serpentin-EMRC), la curva alcanza mayores niveles de corriente comparando con los otros arreglos 1 y 3. La zona de activación se presenta en  $0.12 \text{ A/cm}^2$ , las pérdidas óhmica se observan entre  $0.12$  y  $1.6 \text{ A/cm}^2$ , y la zona de difusión se aprecia a partir de  $1.6 \text{ A/cm}^2$ . En el arreglo 1 se aprecia la zona de activación catalítica alrededor de  $0.1 \text{ A/cm}^2$ , la zona de pérdidas óhmicas se encuentra entre  $0.1$  y  $1.7 \text{ A/cm}^2$ , sin dejar de presentarse como una curva en forma lineal y la zona de difusión se puede observar a partir de  $1.7 \text{ A/cm}^2$ ; sin embargo, como puede observarse esta zona no se presenta prominente como en el arreglo 2, lo cual puede ser consecuencia de un tamaño de poro demasiado grande en el medio de difusión porque nuevamente se presenta mayores pérdidas óhmicas, pero deja como supuesto que encontrando un tamaño de poro adecuado se puede alcanzar mayores niveles de corriente. Finalmente para el último arreglo la zona de activación se da en  $0.11 \text{ A/cm}^2$ , las pérdidas óhmicas se encuentran en el intervalo de  $0.11$  a  $0.95 \text{ A/cm}^2$ , y la zona de difusión se aprecia a partir de  $0.95 \text{ A/cm}^2$ . En general se puede observar un efecto significativo al incrementarse la intensidad de corriente al mismo tiempo que aumenta la presión.

La gráfica 11 B pone en evidencia el efecto predominante de la presión catódica favorable a la funcionalidad de la PEMFC para la combinación 2 (Serpentin-EMRC), para la combinación 1 (Difusor- EMRC) el efecto ya no es favorable y el comportamiento para la combinación 3 (Serpentin-E-TEK) se observa desfavorecido, además, el desplazamiento máximo se presenta a  $0.6 \text{ W}$  de potencia con una densidades de corriente igual a  $1.16 \text{ A/cm}^2$ .



**Figura 12.** Funcionalidad de la curva  $I-U$  para la PEMFC utilizando los diferentes medios de distribución y una presión de 20 psi. a) Combinación y, b) Combinación.



## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

En la figura 12 se observa la curva de polarización para la combinación 1 y 2, la cual muestra nuevamente un comportamiento favorable para el arreglo 2 porque se alcanza mayor densidad de corriente alrededor de  $2.15 \text{ A/cm}^2$ . El comportamiento que presenta el arreglo 1 es favorable a estas condiciones de operación comparando con los casos anteriores, aquí puede observarse una reducción en las pérdidas óhmicas; sin embargo, la zona de activación se muestra favorecida pero sin dejar alcanzar menores valores de corriente aproximadamente  $1.9 \text{ A/cm}^2$ , lo cual puede suponerse que un tamaño óptimo de poro permitirá un mayor alcance de corriente en la pila.

### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio aplico dos medios de transporte para la distribución de los gases a los sitios activos del electrodo: las placas polares en forma de serpentín y dos tipos de medio poroso durante el funcionamiento PEMFC.

El desempeño de la PEMFC aplicando como medio de distribución la placa difusora presenta una mayor linealidad en la curva lo cual con base en los resultados de Kong y Col; el diámetro de poro es el óptimo para presiones menores e iguales a 5 Psi, lo que permite mejorar los fenómenos de transporte de masa en la capa de difusión. En el caso de la combinación 2 donde se utiliza como medio de distribución las placas polares en forma de serpentín y el electrodo EMRC se observa un comportamiento similar que el caso anterior; esto es, al trabajar con presiones catódicas menores e igual a 20 Psi el desempeño de la pila es favorecido lo que permite suponer una mejor difusión de los gases reactantes. Para el tercer caso (combinación 3) se utiliza nuevamente las placas polares pero con el ensamble de electrodos comerciales (E-TEK), sin embargo, el desempeño de la pila no es muy favorable por no alcanzar mayores densidades de corriente.

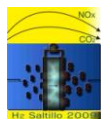
Sin embargo encontrar un tamaño óptimo de poro en un electrodo tipo poroso es de suma importancia para mejorar el desempeño de la pila, esta característica permite también minimizar los problemas de inundación por agua.

### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo Alter-Energías por el financiamiento parcial de este estudio y también agradecemos al Departamento de Química del CINVESTAV por materiales y laboratorio.

### 6. REFERENCIAS

- <sup>1</sup> Kordesch K., G. Simader, *Fuels Cells and Their Applications*, Ed. VCH (1996).



## IX Congreso Internacional de la SMH, Saltillo 2009

- 2 Costamagna P., Srinivasan S. *Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960's to the year 2000. Part I. Fundamental scientific aspects*. J. of Power Sources 102 (2001)242.
- 3 Lawton R Bash JF Barnett SM, *Marine applications of fuel cells*, Oceans/'02 MTS/ IEEEET 3(2002)1784.
- 4 Tae-Young Oh and Seok-Lyong Song, *Present status and future of fuel Cell Development in Hyundai Heavy Industries*, 1st International Forum on Strategic Technology, (2006)209.
- 5 Bautista M. These Doctoral (2004). *Etude des phénomènes de transfert et transport dans une pile à combustible PEMFC en fonctionnement*, Institut National Polytechnique de Grenoble (2004).
- 6 Marchand M. Thèse Doctoral *Gestion de L'eau Dans les Piles a Combustible*, Institut National Polytechnique de Grenoble (1998).
- 7 Jarvis L. P; Cygan P. J; Roberts M. P; *Hybrid power source for man portable applications*, IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine, 18(2003)13.
- 8 Ebesui A. M; Boccuzzi C. V; Ett. G; Janolio, G; Saiki G. Y.; Jardini J.A; Ellem M; Ett V; Development and test of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) for stationary generation, Transmission and Distribution Conferences and Exposition Latin America IEEE /PES, (2004)605.
- 9 Fuell Cell Hanbook. EG&G Services, Parsons Inc. 5th Edition, 2000
- 10 S. Bagotzky, N. V. Osetrova and A. M. Skundin. Russian Journal of Electrochemistry, V.39, No. 9 (2003) 919-934.
- 11 J. Larminie and A. Dicks. Fuel Cell Systems Explained. Ed. Wiley 2<sup>nd</sup> edition, 2003.
- 12 Ton van der Does. Journal of Power Sources 61 (1996) 49-51
- 13 D. L. Wood III, J. S. Yi and T. V. Nguyen. Electroquímica Acta V. 43, No. 24 (1998) 3795-3809.
- 14 P. Costamagna, S. Srinivasan. Journal of Power Sources 102 (2001) 253-269.
- 15 Ch. S. Kong, D-Y Kim, H-K Lee, Y-G Shul, T-H Lee. Journal of Power Sources 4725 (2002) 1-7.
- 16 C. Boyer, S. Gamburzev and A. J. Appleby. Journal of Applied Electrochemistry, 29 (1999) 1095-1102.
- 17 K-H Choi, D-H Peck, Ch. S. Kim, D-R Shin, T-H Lee. Journal of Power Sources, 86 (2000) 197-201.
- 18 J. J. Baschuk, Xianguo Li. Journal of Power Sources 86 (2000) 181-196
- 19 V. A. Paganin, E. A. Ticianelli, E. R. Gonzalez. Journal of Power Sources 70 (1998) 55-58.
- 20 D. R. Sena, E.A. Ticianelli, V.A. Paganin, E. R. Gonzalez. Journal of Electroanalytical Chemistry 477 (1999) 164-170.
- 21 Uwe Beuscher. Journal of the Electrochemical Society, 153, 9 (2006) A1788-A1793.
- 22 C. Moisés Bautista-Rodríguez, Araceli Rosas-Paleta, Andrés Rodríguez-Castellanos, J. Antonio Rivera-Márquez, Omar Solorza-Feria, J. Antonio Guevara-Garcia, J. Ignacio Castillo-Velázquez. *Study of the Flow Fluids and Design Engineering Under PEM Fuel Cell Working Conditions*. Int. J. Electrochem. Sci., 2 (2007) 820 – 831
- 23 S. DUTTA, S. SHIMPALEE and J.W. VAN ZEE. *Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells*. Journal of Applied Electrochemistry 30: 135±146, 2000.
- 24 <http://www.etek-inc.com>
- 25 K. Suárez Alcántara, O. Solorza Feria. “Comparative study of oxygen reduction reaction on Ru<sub>x</sub>MySe<sub>z</sub> (M= Cr, Mo, W) electrocatalysts for polymer exchange membrane fuel cell”. Journal of Power Sources 192 (2009) 165–169