

X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



ESTUDIO COSTO – BENEFICIO ENTRE LA TECNOLOGÍA PEMFC Y TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

C. Moisés Bautista Rodríguez^{2*}, M. G. Araceli Rosas Paleta¹, J. Antonio Rivera Marquez¹, Nancy Tepale Ochoa¹.

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

² 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

Modalidad Oral

RESUMEN

La pila a combustible PEMFC es considerada por diversos estudios como una tecnología aplicable a servicios portátiles como son: equipos eléctricos y electrónicos móviles, así como en diversos servicios de transporte. Las causas de este direccionamiento han sido presentadas dentro de un ámbito técnico-económico. En el presente trabajo se presenta una síntesis técnica comparativa entre un diseño estructural PEMFC convencional y una innovación tecnológica. La segunda parte presenta una evaluación del costo – beneficio de los diseños propuestos con el propósito de determinar la mejor alternativa comercial. Finalmente, los costos PEMFC son comparados con el costo de venta determinado por Comisión Federal de Electricidad, así como el costo de venta de pilas domesticas comerciales de naturaleza alcalina. Los resultados justifican a las recomendaciones bibliográficas relacionadas con el servicio de aplicación comercial para las PEMFC, sin embargo permiten observar una aproximación significativa con los servicios estacionarios en un futuro quizás no muy lejano.



X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



1. INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental está relacionada con la generación y el consumo de energía, dos actividades vinculadas con la dependencia de los recursos petrolíferos. Las condiciones actuales de estos materiales es la reducción de las reservas mundiales, esto trae como consecuencia el requerimiento en el desarrollo de nuevas tecnologías a partir de fuentes de energías renovables para satisfacer las necesidades de la sociedad. En esta necesidad aparecen las pilas a combustible como una tecnología ecológica y eficiente para la producción de energía. Esta tecnología además permite una emisión cero de contaminantes cuando se utiliza Hidrógeno como combustible y también presenta un funcionamiento silencioso lo que puede reducir la contaminación acústica.

El costo es uno de los parámetros por el cual las pilas a combustible aún no son totalmente comercializadas. El material y el costo de manufactura de las placas polares representan el 60 % del costo total de la pila [1] otra característica importante es el costo relacionado con el área a utilizar sobre la MEA [2]. Un estudio sobre las pilas a combustible tipo PEM reporta que el precio en 2007 oscilaba en el rango de 10,000-100,000 Euros/KW para el caso de ventas al por menor. Otro de los costos más significativos en las PEMFC son los electrodos, donde se sitúan los catalizadores de platino. En promedio el costo de los metales utilizados para los electrodos de las pilas a combustible representa aproximadamente el 55% del costo total, lo que resulta superior al costo de cualquier otro componente tal como placa bipolar la cual representa el 10%, capa difusora de gas 10% y membrana polimérica (7%). Investigadores del Instituto INRS de Quebec (Canadá) han publicado en el último número de la revista *Science*, el desarrollo de un material de electrodo constituido por hierro, nitrógeno y carbono (los mismos elementos que integran nuestra hemoglobina) capaz de generar una corriente eléctrica similar a la que producen los materiales a base de platino. Otro avance importante en esta misma dirección lo ha conseguido la empresa



X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



Nisshinbo Industries en Japón mediante la fabricación de una aleación de carbono que produce corriente elevada y presenta elevada resistencia a la corrosión. El costo de este nuevo material de electrodo resulta aproximadamente la sexta parte del costo de un electrodo convencional de platino [3]. Estudios sobre la cantidad de platino para los electrodos muestra la reducción de 10 a 100 veces la carga de platino en los electrodos mediante la utilización de partículas nanocristalinas soportadas en carbón de alta área específica y el impregnado de la capa activa del electrodo con electrolito de conducción protónica [4].

El costo de los componentes de pilas a combustible y durabilidad son temas importantes que necesitan ser tratados, en especial cuando se compara el costo de la electricidad generada por las pilas a combustible PEM con la generada por los métodos convencionales, como son: las centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles y las pilas o baterías comunes. Además, para que las pilas PEM puedan competir con los generadores convencionales estas deben reducir sus costos por lo menos cinco veces, esto lo comento Yue Hung en 2005 [5]. Según el Departamento de Energía de los EE UU, en 1995 el costo fue de US\$ 7,00 por gigajoule (GJ) en grandes plantas de producción. Esto supone un costo para el gas natural de US\$ 2,30 por gigajoule. La producción de hidrógeno por electrólisis usando costos de hidroelectricidad en tarifas de período bajo entre US\$ 10,00 y US\$ 20,00 por gigajoule [6]. El costo del hidrógeno se espera que disminuya en un futuro próximo con la investigación de instituciones públicas y privadas en el ámbito de producción y almacenamiento del mismo. Un estudio reciente realizado por la National Academy of Engineering (Academia Nacional de Ingeniería de EE UU) proyectó los costos futuros al mayoreo para la producción y distribución de H₂. Las plantas centralizadas que lo producen a partir de gas natural o carbón y que lo almacenan en forma comprimida actualmente cobran cerca de US\$ 2 por kilogramo (Un kilo de H₂ equivale aproximadamente a la

X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



energía de 3.78 L de gasolina, cuyo costo se estableció durante el estudio en US\$ 1.12) [5]. Otro estudio prevé el costo del hidrogeno para el año 2030 en 6.2 dólares [7].

De acuerdo con todo lo anterior, en este documento se reportan los resultados de un estudio Técnico – Económico entre la pila PEM con diseño estructural convencional e innovador con pilas primarias (no recargables) tipo alcalinas marca Duracell ® y el costo de venta determinado por Comisión Federal de Electricidad (CFE). Este estudio tiene el objetivo de conocer el costo actual para generar la misma potencia que las pilas a combustible y en consecuencia determinar cuál es más económica para la generación de energía.

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 y una placa con maquinado en forma de serpentín. Este tipo de electrodo presenta los siguientes componentes: i) Una tela de carbón, la cual proporciona resistencia mecánica y conductividad eléctrica, su espesor se encuentra en el intervalo de 0.26 - 0.35 mm y una densidad de 0.49 g/cm³, ii) polvos de carbón tipo Vulcan XC-72, iii) una película de Nafion equivalente a 0.7 mg/cm² ó un contenido de PTFE de 20%, y iv) una carga de catalizador en este caso platino (Pt) de 0.4 mg/cm², la cual se encuentra en un solo lado del electrodo [8, 9].

2.2 Diseño experimental

Para el segundo ensamble se utiliza un medio poroso 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



X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



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 mg/cm^2 de catalizador (platino), en 10% en peso de carbón (E-TEK), en ambos casos se utiliza papel grafitado, 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. La carga de Nafion y catalizador solo se presentan en la capa activa (en contacto con el electrolito) [10].

El área activa utilizada corresponde a 2 cm^2 . Las membranas electrolíticas utilizadas son Nafion® 115 y Nafion® 112 con espesores aproximadamente de $100 \mu\text{m}$ y $50.8 \mu\text{m}$ respectivamente [1, 9, 10]. El área de electrolito utilizado es de 25 cm^2 . El gas combustible alimentado a la PEMFC fue de alta pureza (H_2 , 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 Experimentales 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

En la tabla 2 se presentan los casos de estudio para este trabajo.



X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



Tabla 2. Diseño Experimental para el estudio.

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

Para realizar el estudio costo – beneficio se utiliza la cantidad de energía generada en KW a un tiempo de vida 20 años por la pila PEMFC, conocer la potencia máxima alcanzada por una pila convencional el cual es equivalente a 50 W/Kg [11] y el peso promedio de las pilas alcalinas (0.024 Kg) [12]. Con estos criterios se procede a realizar el cálculo correspondiente de la siguiente manera. Determinar el peso total de pilas en Kg que satisfagan la energía total a 20 años.

1. Para obtener el peso total de las pilas se convierte su aportación energética a W y después dividir entre la potencia máxima de una pila alcalina (50 W/KG).
2. Determinar el número de pilas que se necesitan por peso
3. Calcular el costo total (\$ Mex) para el numero de pilas antes calculado. El costo para una pila Duracell ® es de \$ 19.75 pesos Mexicanos (Junio 2010).
4. Finalmente se procede a calcular el costo por KW de pilas alcalinas.

X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



3. RESULTADOS Y DISCUSION

La comparación técnica entre ambos diseños se presentó y se discutió en el Congreso de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno de 2009 [13].

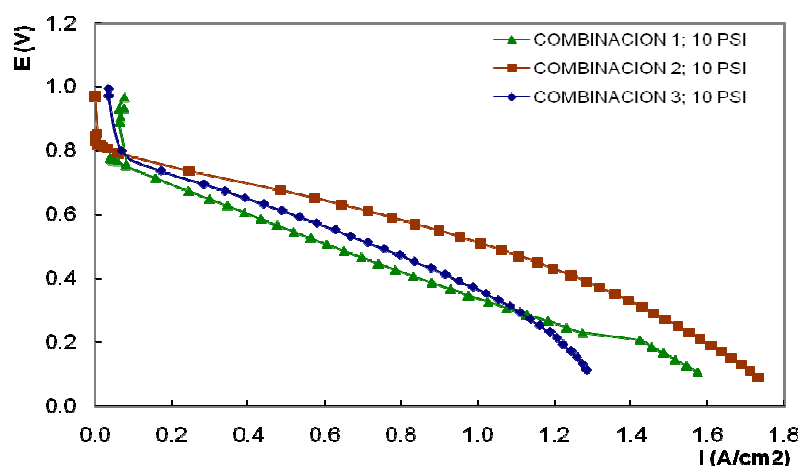


Figura 1. Curva $E - I$ para la PEMFC utilizando las diferentes combinaciones estructurales a una presión de 10 Psi en el compartimiento catódico y 5 Psi en el anódico.

La figura 1 muestra el comportamiento de las diferentes combinaciones en el desempeño de la PEMFC en función de los gases reactivos a 10 psi de presión catódica. Es notable el incremento de la densidad de corriente de la pila cuando se aplica la combinación 2 comparada con la combinación 1, este efecto puede explicarse debido a las mejores condiciones de difusión de los gases reactivos sobre los sitios activos de los electrodos. La figura también muestra el desempeño de la pila cuando trabaja con la placa difusora (combinación 1), esta combinación muestra cambios aparentemente poco significativos en la curva de polarización; sin embargo, es notable un incremento en la densidad de corriente en la zona de difusión a estas condiciones de presión, siendo similares a los resultados de Kong [14]. Una segunda observación se presenta al inicio de la zona de difusión (1.3 A/cm^2) donde el cambio súbito de pendiente podría atribuirse a un incremento instantáneo

X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno “Energías Renovables”



en la concentración de ambos reactivos (principalmente oxígeno) y su reacción. Este mecanismo puede atribuirse en primer lugar a la humedad de la membrana y en segundo lugar a la liberación de la superficie dentro de los poros en el difusor por efecto de un incremento en el esfuerzo cortante del flujo de gas a este nivel de presión catódica. Al liberarse súbitamente el diámetro de entrada de reactivo se incrementa la concentración de oxígeno sobre la superficie reactiva del sistema de forma instantánea, afectando en primer lugar la tensión de la pila y también de la potencia [15].

A partir de estos resultados se procedió a realizar el estudio económico. A continuación se presenta una grafica con la máxima potencia alcanzada a los diferentes niveles de presión a los cuales se trabajo la pila a combustible.

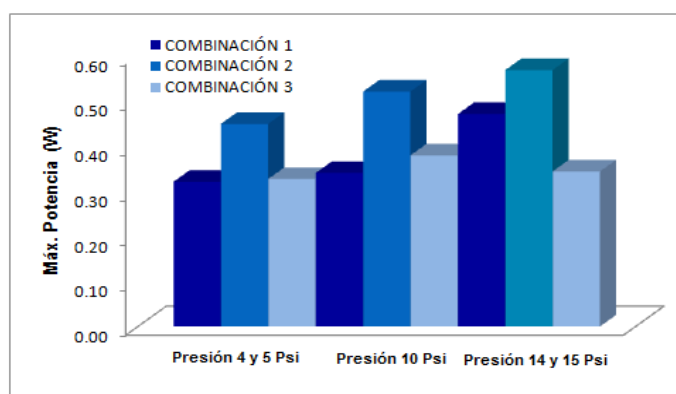


Figura 2. Muestra la potencia máxima alcanzada por cada combinación a los diferentes niveles de presión.

La figura 2 muestra una gráfica comparativa sobre la potencia máxima que alcanza cada una de las combinaciones propuestas a los diferentes niveles de presión. En el caso de la combinación 1 se puede observar un ligero cambio al trabajar con una presión menor e igual a 10 psi, sin embargo la máxima potencia generada se incrementa con una presión

X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



mayor a esta. En el caso particular de la combinación 2 esta alcanza mayores niveles de máxima potencia en función del incremento de la presión. Para las dos primeras combinaciones se puede suponer que a mayores presiones se puede mejorar el nivel de alcance de potencia. En el caso de la combinación 3 se observa el incremento de la máxima potencia al trabajar de 4 a 10 psi y a presiones mayores la máxima potencia disminuye, posiblemente se deba a las problemas de transporte de masa.

Para el cálculo de la viabilidad económica de los diseños PEMFC en estudio se ha llevado a cabo mediante un análisis económico de cada una de las alternativas ó combinaciones con su respectiva placa distribuidora y tipo de electrodo utilizado. En este estudio de tecnologías nuevas únicamente se van a contabilizar los costos directos locales tales como el importe de las materias primas para la fabricación de los electrodos, electrolito, y placas de distribución. El costo de los materiales utilizados para la fabricación de cada tipo de pila se ha calculado a partir de la suma del costo de cada componente utilizado en la fabricación de cada tipo de pila. En este análisis se calculo, para cada caso, el costo total de la inversión a partir del costo por equipo y los costos individuales de materiales específicos para cada pila utilizada. Debido a que se están estudiando prototipos, el estudio económico es dependiente del tamaño de la pila, es decir, el costo de las pilas se va a expresar en unidades monetarias por unidad de potencia eléctrica entregada por cada dispositivo PEMFC. A continuación se presentan los costos generados por la infraestructura utilizada para las pilas a combustible, se presenta una sola tabla debido a que es la misma infraestructura para las tres combinaciones (ver tabla 3). Todos los costos se encuentran actualizados al año 2009. De forma continua se presentan los resultados para un tiempo de vida de 20 años, que es el tiempo de vida para el tanque que almacena hidrógeno. Finalmente con estas referencias se procede a calcular el costo total de inversión.

X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



Tabla 3. Costo de infraestructura para las pilas a combustible

INFRAESTRUCTURA	CANTIDAD	COSTO (\$ MEX)
Depósito de Hidrógeno	1	\$1,734.40
Válvulas de control para Flujo	2	\$25.3
Válvulas de control de Presión	2	\$20.17
Convertidor	1	\$4,046.92
Ventilador	1	\$62.51
Total		\$5,889.30

En la tabla 4 se presenta el costo total de la inversión para la combinación 1 al mismo tiempo de vida antes mencionado. A partir del costo del equipo y la integración se obtiene de la suma total del costo de equipo y el costo de material. En esta tabla se pueden observar los rubros más importantes para el cálculo de la inversión total de la combinación 1, también se presenta el costo total de inversión nuevamente a partir del costo del equipo y la integración de la misma manera antes mencionada para la combinación 2. El costo total de inversión es un valor intermedio entre la combinación 1 y 3, el cual puede ser atribuible al costo de material específicamente a la placa de grafito con maquinado en serpentín y a la membrana y se resumen los conceptos para el cálculo del costo de inversión total, a partir del costo del equipo. Como se observa en las tablas el costo de inversión a partir del equipo es el mismo para ambos casos ya que se utiliza el mismo equipo; sin embargo, para el caso de la integración en la combinación 3 el costo es mayor que las combinaciones anteriores lo cual es atribuible al costo de material el cual considera el electrodo comercial, la placa de grafito y el empaque.

X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



Tabla 4. Costo de inversión total para la combinación 1

Concepto	COMBINACIÓN 1		COMBINACIÓN 2		COMBINACIÓN 3	
	% con respecto al costo del Equipo	% con respecto al costo del Equipo	% con respecto al costo del Equipo	% con respecto al costo del Equipo	% con respecto al costo del Equipo	% con respecto al costo del Equipo
	Planta de Proceso	Integración	Planta de Proceso	Integración	Planta de Proceso	Integración
Equipo	100	100	5,889.30	5,889.30	5,889.30	5,889.30
Materiales	36.1	105.78	2,126.04	287,607.27	2,126.04	288,857.29
Construcción	16.74	35.82	985.87	105,130.47	985.87	105,578.23
Indirectos	25.61	37.05	1,508.25	108,740.48	1,508.25	109,203.61
Ingeniería	19.7	14.22	1,160.19	41,735.21	1,160.19	41,912.96
Administración	9.85	8.23	580.10	24,154.77	580.10	24,257.64
Total	208	301.1	12,249.74	573,257.50	12,249.74	575,699.03

En la tabla 5 se presenta los resultados de la metodología antes mencionada para el cálculo del costo total de pilas alcalinas con referencia a la energía generada por las pilas a combustible al tiempo de vida antes mencionado. De manera particular la tabla muestra el costo total para cada combinación, como se puede observar el costo permanece constante en todos los casos a los diferentes niveles de presión. El costo obtenido para esta tecnología es elevado comparado con CFE y por supuesto con las pilas a combustible.

Tabla 5. Costo \$/KW para pilas Duracell AA.

Pila	kW (Tot) (20 años)	El peso total de pilas Kg	Número de pilas	Costo total (\$Mex)	Costo (\$Mex/kW)
PEMFC – C 2	283508.64	4049222.4	168717600	\$3,498,781,230	\$17,281.25
PEMFC – C 2	328668.19	5670172.8	236257200	\$4,899,383,685	\$17,281.25
PEMFC – C 2	358816.61	4128693.12	172028880	\$3,567,448,899	\$17,281.25



X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



En la tabla 6 que se presenta la comparación de costos para pilas alcalinas y pilas a combustible.

Tabla 6. Comparativo de costos para potencia en pilas PEMFC, Duracell® y CFE.

Tipo de Pila a 4 y 5 Psi	Costo (\$Mex/kW)	Tipo de Pila a 10 Psi	Costo (\$Mex/kW)	Tipo de Pila a 14 y 15 Psi	Costo (\$Mex/kW)
PEMFC – C 2	\$2.64	PEMFC – C 2	\$2.28	PEMFC – C 2	\$2.09
DURACELL	\$1,7281.25	DURACELL	\$1,7281.25	DURACELL	\$1,7281.25
CFE	\$0.48	CFE	\$0.48	CFE	\$0.48

Esta tabla muestra un estudio comparativo de costo para la potencia generada en pilas PEMFC al trabajar a 4 y 5 psi, de pilas alcalinas Duracell y de CFE. Como se puede observar en la tabla el costo mayormente elevado es el de las pilas comerciales Duracell®, y el más accesible es el de CFE. Al realizar este estudio se pudo confirmar que la tecnología PEM es una alternativa mucho más viable para alimentar de energía a dispositivos portátiles que la tecnología actual de pilas alcalinas, estando este resultado de acuerdo con la bibliografía [16,17, 18, 19, 20]

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados se puede concluir que el costo más importante para la estimación de costos lo representa el combustible utilizado (Hidrógeno), en segundo lugar aparecen los componentes físicos como la placa de grafito en serpentín por el maquinado. Como lo demuestran varios autores al realizar estudios con diferentes materiales. Yuan y colaboradores [21] especifican que una placa de grafito representa uno de los costos más



X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



altos debido al costo de maquinado, continuando con la secuencia siguen los empaques, el electrolito, los electrodos comerciales y la placa difusiva. Además el estudio comparativo de costo para pilas PEMFC, pilas alcalinas Duracell y de CFE. Determino el costo mayormente elevado es el de las pilas comerciales Duracell®, y el más accesible es el de CFE. El presente estudio económico justifica la recomendación de la literatura: las PEM son aptas para aplicaciones comerciales en servicios de transporte, industria liviana y en sistemas móviles (portátiles) que requieren energía eléctrica para su funcionamiento o en lugares donde no existe suministro de electricidad mediante métodos convencionales.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo Alter-Energías por el financiamiento parcial de este estudio.

6 REFERENCIAS

- [1] E. A. Cho, U. S. Jeon, H. Y. Ha, S. A. Hong, I. H. Oh, *J. Power Sources*, 125, 178 (2004).
- [2] Ai-Jen Hung. Process System Engineering. *AIChE Journal* Vol. 54, No. 7 July 2008
- [3] www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2009/05/04/117572
- [4] Tori, C.; Barsellini, D.; Visintin, A.; Triaca, W. E. Desarrollo de Prototipos de Celdas a Combustible Multimódulo de Tecnología PEM.
- [5] www.motortrendenespanol.com/...hidrogeno/index2.html
- [6] http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17756.html#h2_3
- [7] Hung, K. M. El-Khatib, and Hazem Tawfik. *Journal of Applied Electrochemistry* 35:445–447 (2005).
- [8] M.I. Juan Carlos Pichardo Macías. Material de la materia de costos. Maestría en Ingeniería Química. (2009)
- [9] E.J. Carlson, P. Kopf, J. Sinha, S. Sriramulu, and Y. Yang. Cost Analysis of PEM Fuel Cell. TIAX LLC Cambridge, Massachusetts. September 30, (2005).



X Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno

“Energías Renovables”



- [10] <http://www.cfe.gob.mx/casa/ConocerTarifa/Paginas/Conocetutarifa.aspx>. Comisión Federal de Electricidad.
- [11] es.wikipedia.org/wiki/Batería_recargable
- [12] www.amexpilas.org/tablas/generacion.pdf
- [13] M. G. Araceli Rosas Paleta, C. Moisés Bautista Rodríguez, J. Antonio Rivera Márquez, Nancy Tepale Ochoa. Transporte de Masa en una Pila a Combustible tipo PEMFC utilizando Combinaciones de Platos Monopolares y Medios de Difusión de Reactivos. *IX Congreso Internacional de la SMH*, Saltillo 2009.
- [14] Kong C. S. Kim D. Y., Lee H. K., Shul Y. G., Lee T. H. Influence of pore size distribution of diffusion layer on mass transport problems of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 108, 185-191 (2002)
- [15] C. Moisés Bautista Rodríguez, M. G. Araceli Rosas Paleta, J. Antonio Rivera Márquez, A. Belén Tapia Pachuca, J. Roberto García de la Vega. Effect of a Rigid Gas Diffusion Media Applied as Distributor of Reagents in a PEMFC in Operation, Part I: Dry Gases. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 4 (2009) 1754 – 1769
- [16] <http://www.unizar.es/icma/divulgacion/pdf/pdfceldascomb.pdf>. Elaborado por: Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA). Consejo superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- [17] http://www.fuelcell.no/applications_portable_es.htm
- [18] www.enedis.com.ar
- [19] en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell
- [20] www.fuelcell.no/applications_portable_es.htm
- [21] Xiao Zi Yuana, Haijiang Wanga, Jiujun Zhanga, David P. Wilkinson. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 8, 257-267 (2005).