

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO.

### Design and construction of a proton exchange membrane fuel cell.

#### RESUMEN

Una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico (CCMIP) es un dispositivo que produce electricidad, calor y agua usando hidrógeno y aire. En este trabajo se ha diseñado y construido una CCMIP con un área activa de 25 cm<sup>2</sup>. Las partes de la celda fueron diseñadas usando SolidWorks 2005. Adicionalmente se muestra el diseño y construcción del sistema de alimentación y humidificación de aire e hidrógeno. Por último se describe el sistema de control de temperatura implementado.

**PALABRAS CLAVES:** Celdas de combustible, hidrógeno, membrana de intercambio protónico.

#### ABSTRACT

A Proton Exchange membrane fuel cell (PEMFC) is a device that produces electricity, heat, and water using hydrogen and air. In this work, we have designed and built a twenty five cm<sup>2</sup> active area single PEMFC. The fuel cell components were designed using SolidWorks 2005. Additionally, it is shown the designed and built feed and humidification system for the hydrogen and air. Lastly it is described the implemented temperature control system.

**KEYWORDS:** Fuel cells, hydrogen, proton exchange membrane.

#### JUAN E. TIBAQUIRÁ G.

Ingeniero Mecánico. M.Sc.  
Profesor Asociado  
Universidad Tecnológica de Pereira  
juantiba@utp.edu.co

#### JONATHAN D. POSNER

Ingeniero Mecánico, Ph.D.  
Profesor Asistente  
Arizona State University  
Jonathan.Posner@asu.edu

### 1. INTRODUCCIÓN

Una celda de combustible puede definirse como un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de la reacción entre el hidrógeno (H<sub>2</sub>) y el oxígeno (O<sub>2</sub>) en electricidad y calor. El subproducto de dicha reacción es agua (H<sub>2</sub>O) [1]. Existen diferentes tipos de celdas de combustible las cuales se clasifican de acuerdo al combustible y al electrolito utilizado [2].

Las celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico (CCMIP), usan hidrógeno como combustible y una membrana polimérica como electrolito [3]. El hidrógeno fluye por el ánodo y es disociado en la capa catalizadora formando protones y electrones. Ver figura 1. Los protones pasan a través de la membrana la cual es diseñada para permitir el paso de cationes pero es impermeable al paso de corriente eléctrica, gases y aniones. Así los electrones son obligados a pasar por el circuito externo generando energía eléctrica. Luego electrones y protones reaccionan en el cátodo con el oxígeno presente en el aire y con la ayuda de la capa catalizadora del cátodo forman agua. Las reacciones químicas que tienen lugar en una CCMIP se muestran a continuación:

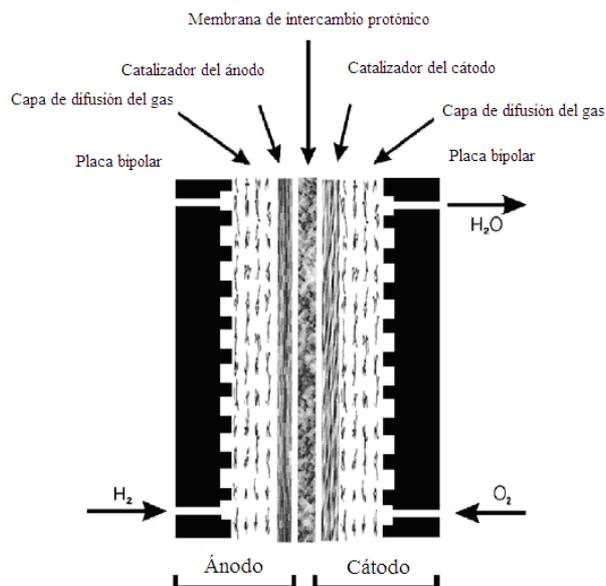
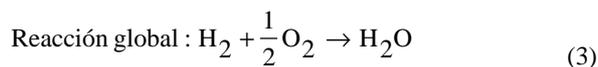
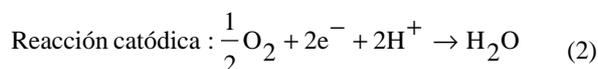
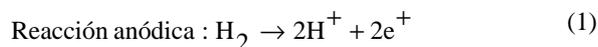


Figura 1. Vista lateral de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico [4].

Actualmente en el Laboratorio de Microfluidos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Estatal de Arizona en Estados Unidos se están desarrollando proyectos de investigación que involucran el estudio de la cantidad y calidad del agua producida por una CCMIP. De allí nació la necesidad de diseñar y construir un banco experimental de una CCMIP. Alrededor del mundo diferentes grupos de investigación que tienen instalaciones experimentales similares a la propuesta en este trabajo, todos ellos investigando diversos temas relacionados al funcionamiento y optimización de una CCMIP [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

La celda diseñada y construida tiene la configuración mostrada en la figura 2.

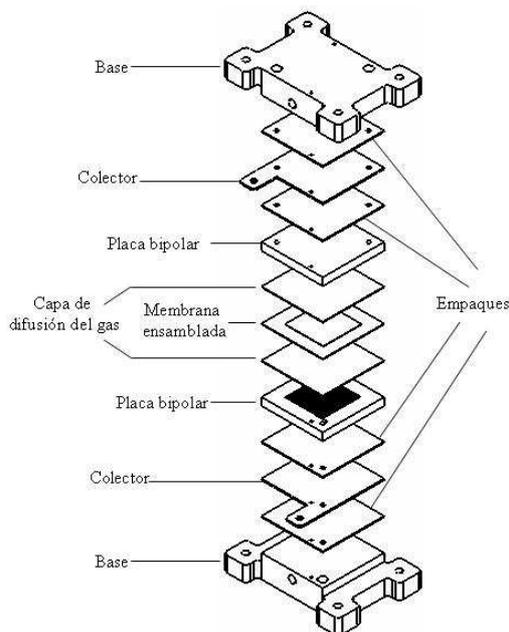


Figura 2. Esquema de la celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico diseñada y construida.

## 2. PARTES DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE CONSTRUIDA

A continuación se muestra en detalle cada una de las partes de la celda diseñada y construida durante este estudio. Además se describen los sistemas de alimentación y humidificación de gases al igual que el sistema de control de temperatura implementado.

### 2.1 Bases

La función principal de las bases es servir de estructura para ensamblar la celda de combustible. Las bases también sirven como alojamiento para los calentadores, los cuales se encargan de mantener la celda a la temperatura de operación adecuada (Entre 30 y 100°C). Las bases diseñadas fueron construidas en Aluminio 6061. Este tipo de aluminio se caracteriza por su buena

resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y maquinabilidad. Ver figura 3.

### 2.2 Placas colectoras

Las placas colectoras son las encargadas de conducir los electrones generados en la celda de combustible para llevarlos a la carga eléctrica. Las placas diseñadas fueron construidas en cobre. Posteriormente fueron recubiertas con una capa de oro y níquel con el propósito de mejorar su conductividad eléctrica. Ver figura 4.

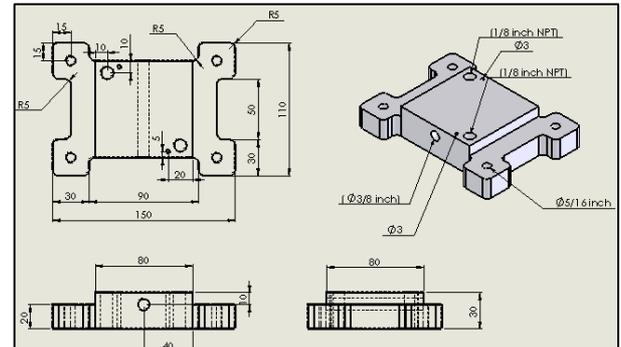


Figura 3. Planos constructivos de la base de la celda de combustible. Dimensiones en [mm] a menos que se especifique de otra forma.

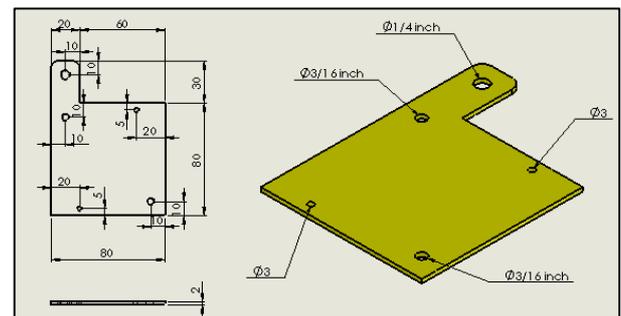


Figura 4. Planos constructivos de la placa colectoras de la celda de combustible. Dimensiones en [mm] a menos que se especifique de otra forma.

En la figura 5 pueden apreciarse las varillas de alineación las cuales son usadas para asegurar la alineación de la celda de combustible durante el ensamble de todo el cuerpo.

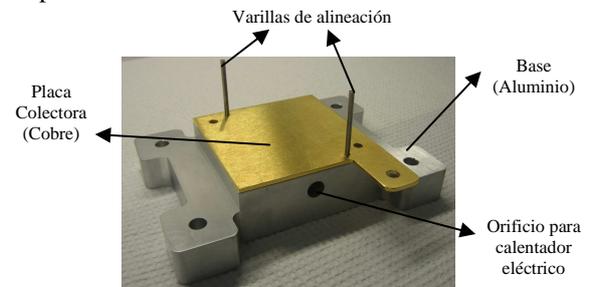


Figura 5. Ensamble de la base y la placa colectoras.

### 2.3 Placas bipolares

Las placas bipolares deben distribuir el hidrógeno y el aire. Además extraen el agua formada en la celda y transmiten la corriente eléctrica hacia los colectores. Las placas bipolares fueron construidas en grafito (Una de las formas del carbono). Se usa grafito debido a que las placas bipolares requieren buena estabilidad química, alta resistencia mecánica, buena conductividad eléctrica y bajo costo. Ver figura 6.

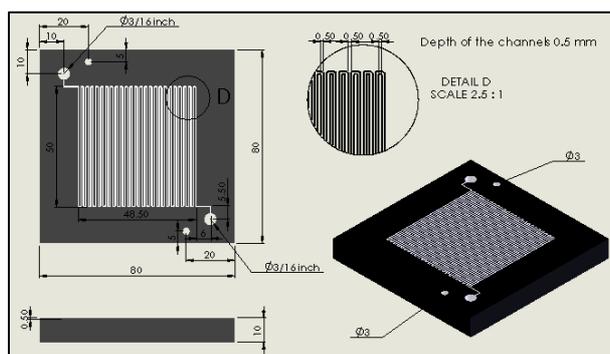


Figura 6. Planos constructivos de la placa bipolar de la celda de combustible. Dimensiones en [mm] a menos que se especifique de otra forma.

La figura 6 muestra los planos constructivos de la placa bipolar diseñada y. Los canales diseñados y construidos son de 500 μm de ancho y de profundidad.

### 2.4 Membrana, capa catalizadora y capa de difusión del gas

La membrana de intercambio protónico es fabricada de un fluoropolímero sulfonado conocido como NAFION<sup>®</sup> desarrollado por Dupont. Existen diferentes tipos de NAFION<sup>®</sup>, como se muestra en la tabla 1, de acuerdo a su espesor. Las membranas más delgadas garantizan mayor conductividad de iones.

Tipo de NAFION <sup>®</sup>	Espesor
N 112	51 μm
N 1135	89 μm
N 115	127 μm
N 117	178 μm

Tabla 1. Diferentes tipos de NAFION ofrecidos por Dupont.<sup>12</sup>

El conjunto comprendido entre membrana, capa catalizadora y capa de difusión del gas es conocido como *ensamble membrana electrodo* o MEA (por sus siglas en inglés, *membrana electrode assembly*). En el mercado pueden encontrarse dos tipos diferentes de ensamble de membrana y electrodo, a saber:

- De 3 capas: capa catalizadora del ánodo – membrana de intercambio protónico – capa catalizadora del cátodo. Las capas de difusión del gas deben adquirirse por separado.

- De 5 capas: capa de difusión del gas del ánodo - capa catalizadora del ánodo - membrana de intercambio protónico - capa catalizadora del cátodo - capa de difusión del gas del cátodo.

La figura 7 muestra la sección longitudinal de una CCMIP allí se pueden apreciar las diferentes partes que componen el ensamble membrana y electrodo.

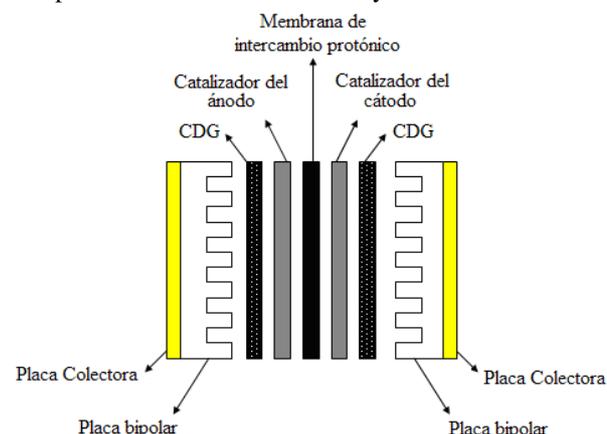


Figura 7. Sección longitudinal de una CCMIP

La figura 8 muestra un ensamble membrana y electrodo de 3 capas. La sección transparente corresponde a la membrana de intercambio protónico, NAFION<sup>®</sup> 112 en este caso, y la sección oscura a la capa catalizadora del cátodo. La capa catalizadora en ambos lados cátodo y ánodo corresponde a 0.3 mg /cm<sup>2</sup>/lado de platino (Pt). Las partículas de platino son adheridas a partículas mas grandes de carbono (Ver figura 8). Esta técnica ha sido desarrollada con el propósito de disminuir el aporte de platino, debido a su alto costo.

### 3. ENSAMBLE

Para el ensamble de la celda fueron utilizados tornillos de acero inoxidable de 5/16”-18 por 3 3/4” de longitud. Además como se estableció anteriormente se usan un par de varillas de 2.8 mm de diámetro (Se pueden apreciar en la figura 5) con el propósito de asegurar la perfecta alineación de los elementos que forman la celda de combustible.

### 4. SISTEMAS AUXILIARES

Para el desarrollo de los experimentos de la celda de combustible se hace necesario implementar dos sistemas auxiliares:

- Sistema de humidificación de gases
- Sistema de control de temperatura

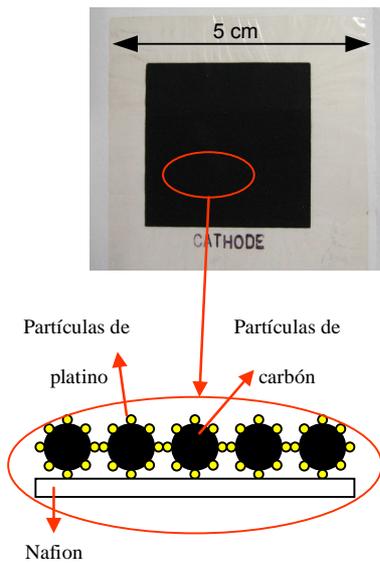


Figura 8. Ensamble membrana electrodo y composición de la capa catalizadora.

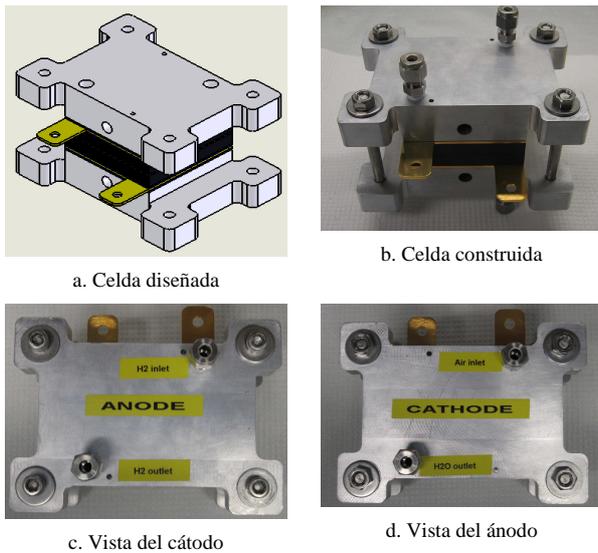


Figura 9. Ensamble de la celda de combustible.

**4.1 Sistema de humidificación de gases**

El manejo del agua en una CCMIP es crítico ya que la membrana de intercambio protónico debe mantenerse adecuadamente hidratada para asegurar una alta conductividad de protones. Demasiado contenido de agua puede causar inundación de los poros de la capa de difusión del gas o de la capa catalizadora, lo que causa mayor resistencia para la transferencia de masa de los reactantes. Así una humidificación adecuada de la membrana asegura un funcionamiento correcto de la celda de combustible.

Para asegurar el correcto funcionamiento de la celda de combustible fue diseñado y construido un sistema de

humidificación de gases (hidrógeno y aire). El sistema está compuesto por dos recipientes a presión por los cuales circulan las corrientes de hidrógeno y aire, con el propósito de humidificarse. Cada recipiente contiene un calentador eléctrico para asegurar que los gases lleguen a la celda de combustible a una temperatura óptima de humidificación. En la figura 10 y 11 se muestran el recipiente y la tapa del recipiente diseñados.

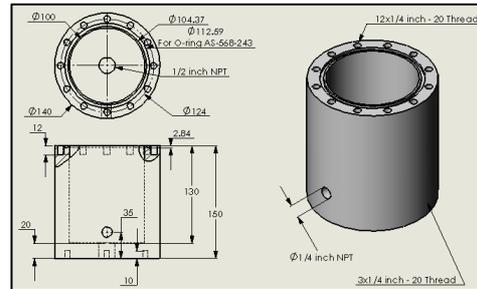


Figura 10. Planos constructivos del recipiente de humidificación. Dimensiones en [mm] a menos que se especifique de otra forma.

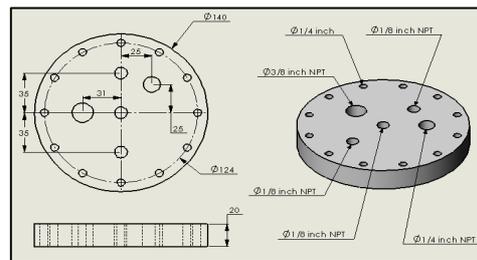


Figura 11. Planos constructivos de la tapa del recipiente de humidificación. Dimensiones en [mm] a menos que se especifique de otra forma.

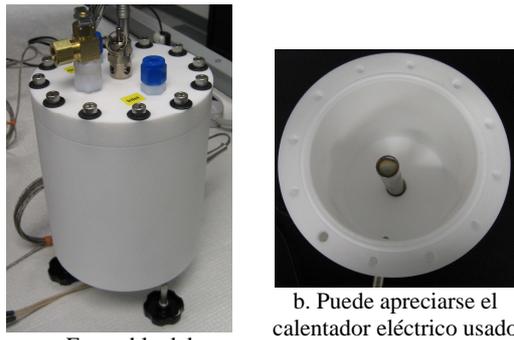
El ensamble definitivo del recipiente de humidificación y su respectiva tapa se muestran en las figuras 12 y 13. Cabe recordar que se usa un recipiente para cada gas, hidrógeno y aire.

**4.2 Sistema de control de temperatura**

Se implementó un sistema de control temperatura con el objetivo de monitorear y configurar las siguientes temperaturas:

- Temperatura de la celda de combustible
- Temperatura del recipiente de humidificación de hidrógeno
- Temperatura del recipiente de humidificación de aire
- Temperatura del tubo caliente de hidrógeno
- Temperatura del tubo caliente de aire

El diagrama del sistema de control de temperatura implementado se muestra en la figura 14.



a. Ensamble del recipiente

b. Puede apreciarse el calentador eléctrico usado

Figura 12. Recipiente a presión para la humidificación de gases



Figura 13. Vista superior del recipiente a presión para la humidificación de gases

**4.2.1 Temperatura de la celda de combustible**

Para asegurar el correcto funcionamiento de una CCMIP es necesario operarla en un rango de temperatura entre 30 y 100 °C. Entre mayor es la temperatura de la celda la reacción electroquímica procede más rápidamente. Pero temperaturas demasiado altas evaporan el agua presente en la membrana lo cual se traduce en un mal funcionamiento de la celda. La presencia o no de un sistema externo de humidificación determina la temperatura de operación del sistema. En este diseño la temperatura escogida ha sido 60°C. Para tal efecto la celda esta equipada con un par de calentadores eléctricos cada uno de 250 W a 120 V. Los orificios donde van insertados dichos calentadores se muestran en la figura 5. Para controlar la temperatura de la celda de combustible se usa un termopar tipo K (Rango de medición -200°C a 1250°C).

**4.2.2 Temperaturas de los recipientes de humidificación**

Como se mencionó cada recipiente de humidificación cuenta con un calentador eléctrico. Los calentadores son fabricados en acero inoxidable 316 y disipan 405 W a 120 V. Cada recipiente esta dotado con un termopar tipo J (Rango de medición 0°C a 750°C), como se aprecia en

la figura 13. El sistema de control de temperatura maneja independientemente cada recipiente.

Es importante anotar que la selección final de cada termopar dependió de la aplicación, material, montaje del mismo y de lo ofrecido por el fabricante OMEGA®.

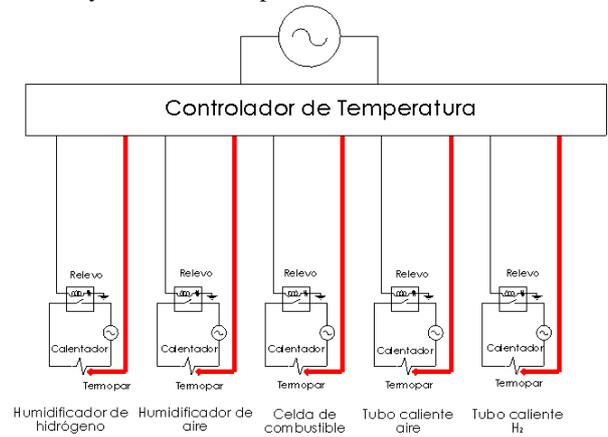


Figura 14. Diagrama del sistema de control de temperatura implementado

**4.2.3 Temperatura de los tubos calientes**

Los tubos calientes se usan para mantener la temperatura de los gases después de salir de los recipientes de humidificación y antes de entrar en la celda de combustible. Dichos tubos cuentan con una resistencia eléctrica de 50 W y un termopar tipo K. Usan un aislamiento térmico para disminuir las pérdidas de calor. Dichos tubos pueden observarse en la figura 17.

**4.2.4 Controlador de temperatura**

Se usa un controlador de temperatura marca OMEGA referencia CN1507TC (Resolución: 1C/1F. 0.1% de la escala total). Dicho controlador tiene la capacidad de controlar hasta 7 temperaturas.

**4.2.5 Módulo universal de relevos**

Se utiliza un módulo universal de relevos para llevar a cabo las acciones de control. El módulo usado tiene disponible 8 relevos. El módulo también es marca OMEGA y su referencia es URM-800.

Finalmente el controlador de temperatura y el módulo de relevos son montados en una sola caja ver figura 15.

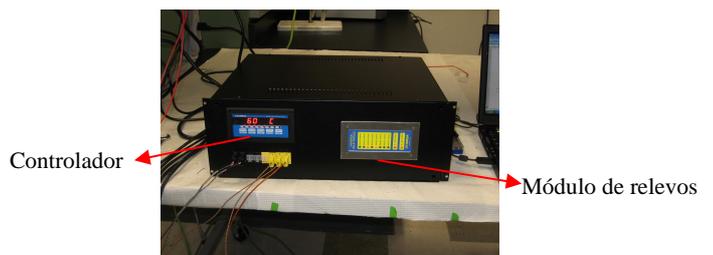


Figura 15. Caja de control

## 5. MONTAJE FINAL

El montaje final para poner en operación la celda de combustible se puede ver en las figuras 16 y 17.

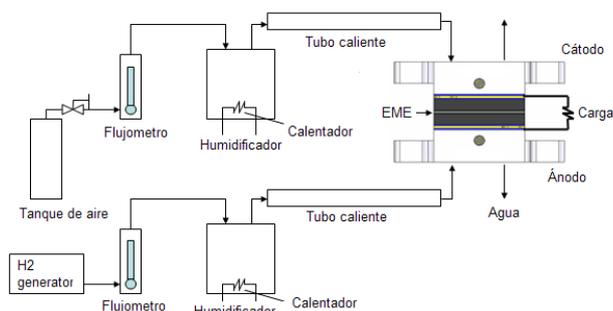


Figura 16. Diagrama de flujo del montaje final de la CCMIP



Figura 17. Montaje de la celda de combustible

## 6. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico (CCMIP) con un área activa de 25 cm<sup>2</sup>. La celda construida puede ser operada variando independientemente los siguientes parámetros:
  - ✓ Tipo de membrana utilizado
  - ✓ Flujos de aire e hidrógeno
  - ✓ Presión de alimentación de aire e hidrógeno
  - ✓ Temperatura de:
    - Celda de combustible
    - Recipientes de humidificación
- Las CCMIP se perfilan como una de las mejores opciones para reemplazar la utilización de combustibles fósiles en automóviles y dispositivos portátiles.
- Es de vital importancia realizar proyectos de investigación en Colombia en el área de celdas de combustible para determinar la viabilidad de su implementación en los próximos 15-20 años.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Rozo y J. Tibaquirá. “Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico”. *Scientia et Technica*, pp. 279-283, Dic. 2007. Disponible en Internet: <http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/125555279-283.pdf>
- [2] Larminie, J. and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons, 2003.
- [3] Healy, J., et al., Aspects of the chemical degradation of PFSA ionomers used in PEM fuel cells. *Fuel Cells*, 2005. 5(2): p. 302-308.
- [4] V.M. Vishnyakov. “Proton exchange membrane fuel cells”. *Vacuum* 80 (2006) 1053–1065. 2006.
- [5] Buie, C.R., et al., Water management in proton exchange membrane fuel cells using integrated electroosmotic pumping. *Journal of Power Sources*, 2006. 161(1): p. 191-202
- [6] Litster, S., et al., Active water management for PEM fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007. 154(10): p. B1049-B1058.
- [7] Merida, W.R., G. McLean, and N. Djilali, Non-planar architecture for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2001. 102(1-2): p. 178-185.
- [8] Zhang Xi-gui, X.B.-j., Liu Juan-ying, Tao, W., and Pei, Q., Optimization of unhumidified membrane electrode assembly for micro PEMFC. *Battery Bimonthly*, 2005. 35(5): p. 9.
- [9] Ahmed, S., et al., Water balance in a polymer electrolyte fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 2002. 112(2): p. 519-530.
- [10] Yan, Q.G., H. Toghiani, and J.X. Wu, Investigation of water transport through membrane in a PEM fuel cell by water balance experiments. *Journal of Power Sources*, 2006. 158(1): p. 316-325.
- [11] Satija, R., et al., In situ neutron imaging technique for evaluation of water management systems in operating PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2004. 129(2): p. 238-245.
- [12] S. Banerjee and D. Curtin. “Nafion® perfluorinated membranes in fuel cells”. *Journal of Fluorine Chemistry* 125. 1211-1216. 2004