

# Diseño, Fabricación y Evaluación de una Celda de Combustible Tipo PEM, para el Sector Automotriz

<sup>1,2</sup>del Valle Soberanes Benigno Alejandro

<sup>2</sup>Girón Cardoz Nubia, <sup>2</sup>Gallardo Villanueva M. René, <sup>2</sup>Díaz Ocampo M. Ángel  
<sup>3</sup>Sebastian P. Joseph

<sup>1</sup>Ingeniería en Sistemas Computacionales, Comunicación y Electrónica, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Fray Luca Paccioli  
Zarco No. 8 Centro, Cuernavaca Mor.  
Tels: (01777) 312 1054 y 312 1055

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) Chihuahua, Chihuahua

<sup>3</sup>Centro de Investigación en Energía (CIE-UNAM) Temixco, Morelos  
e-mail: [bavs@cie.unam.mx](mailto:bavs@cie.unam.mx)

## RESUMEN

*La energía constituye la columna vertebral del desarrollo social y económico de los países, sin embargo, muchas de las vías empleadas para su producción, no son lo suficientemente adecuadas para garantizar la creciente demanda de manera sustentable. Las Celdas de combustibles son dispositivos que permiten generar energía eléctrica de forma directa y sin productos de desechos contaminantes a partir de reacciones electroquímicas, además de operar totalmente silenciosa y con alta eficiencia. Estas se caracterizan por una serie de ventajas que relacionamos a continuación, las cuales sustentan el vertiginoso desarrollo de las mismas en aplicaciones terrestres:*

- a) Alta eficiencia de conversión de combustible a electricidad.*
- b) Capaces de utilizar un rango muy amplio de combustibles.*
- d) Reducción del volumen de emisión de contaminantes.*
- e) Silenciosas al carecer de partes móviles.*

*Existen varios tipos de Celdas de Combustible las cuales se encuentran en diferentes etapas de investigación y desarrollo. Estas se clasifican generalmente por la sustancia que sirve como puente para el intercambio de iones entre el ánodo y el cátodo (electrolito): Ácido fosfórico (PAFC), Alcalinas (AFC), Carbonato Fundido (MCFC), Óxidos Sólidos (SOFC) y Membrana Intercambiadora de Protones (PEMFC). Se fabricaron platos bipolares (colectores) de corriente, de Acero Inoxidable, en el proceso de diseño y fabricación de una monocelda. Se variaron parámetros críticos tales como la forma y el tamaño de los canales de flujo de gases. Los platos bipolares serán utilizados en la construcción de una monocelda*

*y evaluados en una estación de pruebas de celdas de combustibles, lo cual nos permitirá conocer su comportamiento y estabilidad.*

## 1. Introducción

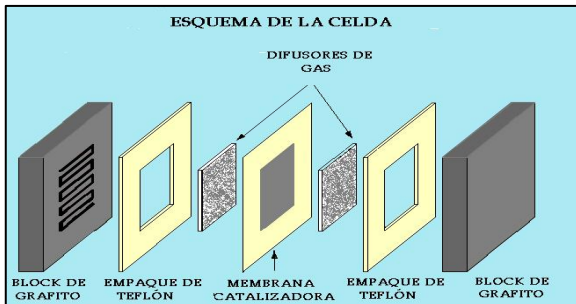
Las Celdas de combustibles son dispositivos que permiten generar energía eléctrica de forma directa y sin productos de desechos contaminantes a partir de reacciones electroquímicas, además de operar totalmente silenciosa y con alta eficiencia. Los elementos que constituyen la estructura de la celda de combustible PEMFC constan de:

- **Ánodo:** Es el electrodo en donde se lleva a cabo la reacción de oxidación del combustible, en este caso el hidrógeno.
- **Cátodo:** Es el electrodo en donde se lleva a cabo la reacción de reducción del comburente, en este caso el oxígeno.
- **Electrolito polimérico:** Es el medio en el cual se desplazan los protones resultantes de la oxidación del hidrógeno en el ánodo hacia el cátodo, también se le conoce como membrana intercambiadora de protones.
- **Difusores:** Son los encargados de distribuir de manera uniforme el hidrógeno y el oxígeno sobre el ánodo y el cátodo para que se efectúen de manera mas eficiente las reacciones de oxidación y reducción, se utilizan dos por cada celda, están hechas de papel de carbón poroso hidrofobizado, o tela de carbón. Estas capas son de 100-300µm de espesor. Obviamente, tienen que ser hechas de un material de alta conductividad eléctrica y que sea estable en un medio ambiente mojado.

- **Colectores de corriente:** Cumplen dos funciones básicas, contienen los ductos por donde viajan el hidrógeno y el oxígeno para llegar al difusor y colectan los electrones de la reacción de oxidación en el ánodo para que puedan viajar a través de un circuito eléctrico externo en forma de corriente eléctrica haciéndolos llegar al cátodo, cada celda requiere dos platos colectores.
- **Empaque de Teflón:** es un empaque de plástico resistente a la temperatura, su función es la de sellar el proceso electroquímico es el corazón de la celda y evitar que haya fugas.

Este ensamble (MEA), con espesor menor a un milímetro, es la parte principal de la celda de combustible.

En general una PEMFC es relativamente sencilla, sus partes y componentes son mostrados en la figura 1. El ensamble membrana/electrodos puede verse como la estructura genérica de una celda electroquímica: electrodo/electrolito/electrodo, empacada en la forma de un “sándwich” de tres películas delgadas. Este ensamble (MEA), de espesor menor que un milímetro, es el corazón de la celda de combustible.



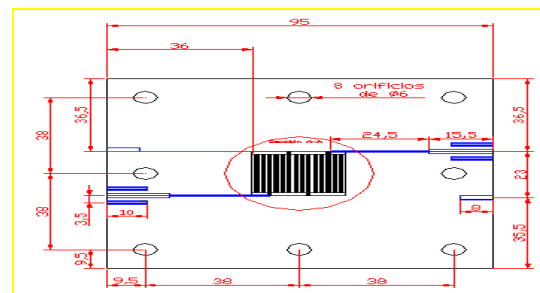
**Figura 1. Esquema de las diferentes partes y componentes de una PEMFC.**

El alto costo, peso y volumen afecta su aplicación en gran escala en sistemas móviles, en tal sentido se diseñó y construyeron platos bipolares metálicos en sustitución del grafito de alta pureza, actualmente utilizados en las celdas de combustible, se sustituirá el material de grafito de alta pureza que realizan la función de platos de corriente por otros materiales menos costoso como el acero inoxidable y Al. Paralelamente se estudiarán diferentes variantes para la realización de los canales de entrada, distribución y salida de los gases, al mismo tiempo de

determinar el mínimo espesor necesario para este componente. El acero inoxidable 304, tiene excelente resistencia a la corrosión, y suele tener un costo relativamente bajo. Se usa en equipos químicos para resistir la corrosión por ácido nítrico. Dado que la resistencia a la oxidación es independiente del contenido de carbono, las aleaciones suaves, fáciles de forjar, de bajo contenido de carbono pueden laminarse para formar placas, perfiles y láminas.

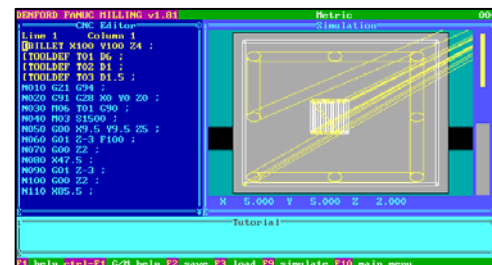
## 2. Fabricación

En el proceso de diseño y fabricación de los platos bipolares, se variaron parámetros críticos tales como la forma, el tamaño de los canales de flujo de gases y evaluación de los mismos. El diseño de los platos bipolares se realizó en autocad, figura 2.



**Figura 2. Representación del plato bipolar.**

En este primer trabajo se realizó el programa en el software Mastercam V 8.0, de acuerdo a los canales de flujo de la figura 3.



**Figura 3. Representación de la simulación de maquinado en C.N.C.**

Para la construcción de platos bipolares de acero inoxidable se llevó a cabo mediante control numérico. El control numérico nace debido a la

necesidad de tener flexibilidad en la fabricación de piezas. Las ventajas del control numérico son:

- Fabricación de diversidad de piezas en relación a geometría.
- Cambio de herramientas rápido.
- No intervención manual en el proceso de maquinado.
- Velocidad y avances variables.
- Movimientos precisos, definidos y simultáneos en los tres ejes.

El programa de la pieza a producir está en un archivo en la computadora, por lo que su cambio a la máquina C.N.C. Denford Tools Fanuc Milling, se hace rápidamente y libre de errores.

El fresado en C.N.C. requiere una planificación más cuidadosa y una mejor orientación del ángulo de mecanizado en relación a la superficie, para conseguir la alta velocidad de corte en la periferia de la herramienta, mientras que el centro de rotación tiene velocidad nula. También hay limitaciones de diseño respecto al husillo. Velocidades de 18.000 a 25.000 rpm son comunes, pero al usar herramientas de pequeño diámetro, son deseables velocidades de 60.000 a 80.000 rpm. El centro de mecanizado no sólo necesita husillo de alta velocidad, sino además su cuerpo debe ser rígido, libre de vibraciones, y con guías y actuadores rápidos. Durante el procesado, en una situación ideal se monitorizan el desgaste de la herramienta y las fuerzas de corte. La figura 4, muestra el proceso de fabricación por C.N.C.



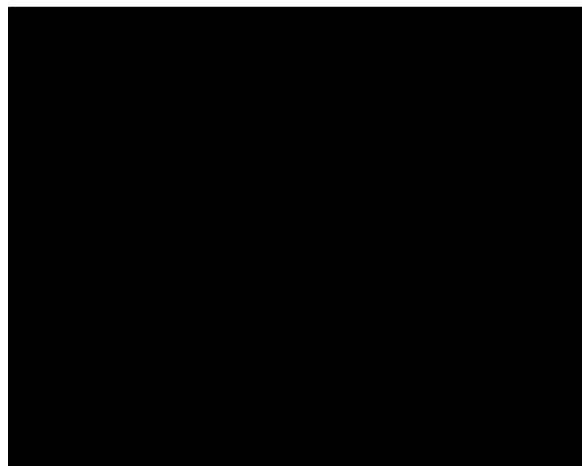
**Figura 4. Proceso de fabricación por C.N.C.**

### 3. Evaluación

La evaluación de los platos bipolares se llevó a cabo utilizando una celda experimental de 5W y de 5 cm<sup>2</sup>

de área activa. El estudio de funcionamiento estuvo basado en la sustitución de los platos bipolares comerciales, de grafito de alta pureza, por los platos metálicos desarrollados en este trabajo.

La Figura 5, muestra la curva típica de la respuesta característica de corriente contra voltaje, o simplemente denominada I-V. Normalmente existen tres mecanismos identificados en la respuesta del sistema: las pérdidas por activación, por caída óhmica y por difusión. Las pérdidas por activación están relacionadas con el sobrepotencial que se requiere para que el material catalítico actúe. Las pérdidas por difusión están asociadas a la falta de cantidad adecuada de reactantes en la MEA.



**Figura 5. Características eléctricas I-V de una celda de combustible tipo PEM típica.**

Como consecuencia de los beneficios de la tecnología modificada permite competir con los productos extranjeros, lo que a su vez da pauta para la salida al mercado internacional ya que todos los materiales a requerir para esta innovación se encuentran en nuestro país y no dependeríamos de otros países evitándonos gastos de importación, costos por variación de moneda extranjera y otros impuestos. El medio ambiente es importante para el ser humano así como el recurso energético es muy importante para la economía de cualquier país así es que este proyecto se enfoca a ambas situaciones que nos ayudara a generar energía sin contaminación.

### 4. Análisis de Resultados

Se realizaron diferentes geometrías de canales de flujo para determinar el diseño, optimización y fabricación para un mejor funcionamiento de la celda de combustible tipo PEM.

Para posteriormente realizar el maquinado en una maquina de C.N.C. Denford Tools Fanuc Milling, figura 6.

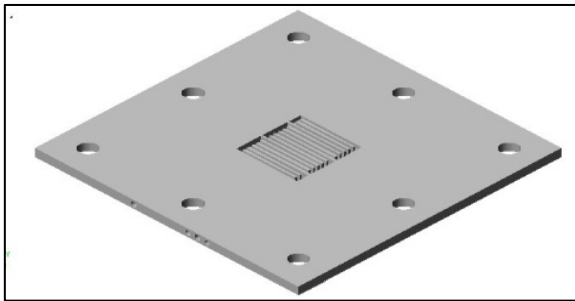


Figura 6 Modelado del plato bipolar en 3D

A este tipo de diseño de Serpentin Simple, se realizo una simulación en el cual tiene un diseño básico utilizado frecuentemente en los platos bipolares, su configuración ha tenido diferentes variantes pero conservando siempre el mismo principio así como el diseño de serpentin triple. Este diseño se ve afectado por el cambio brusco de la dirección del gas al final de cada canal y provoca que exista una disminución de presión fuerte sobre la superficie conforme el gas se acerca a la salida (ver contornos de presión), figura 7.

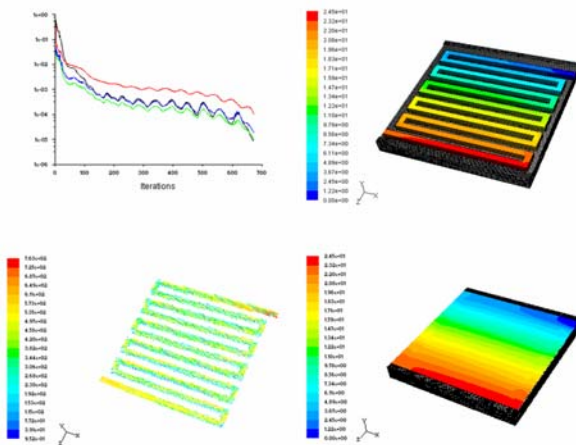


Figura 7. Simulación de canales

Los resultados preliminares indican que los valores de caracterización de los platos bipolares tipo PEM de grafito dan resultados similares a los platos bipolares que fueron construidos de acero inoxidable.

Utilizando el C.N.C. se tienen los siguientes beneficios:

- Alta calidad del plato bipolar.
- Reducir costo unitario del producto final
- Facilitar el proceso de fabricación.

Todos los recursos materiales a emplear se encuentran con mucha facilidad en nuestro país para lo cual no requerimos de la importación de materiales, el medio ambiente como nosotros mismos nos veríamos beneficiados, la importancia de crear tecnología en México es importante para la economía del nuestro país, de ahí la importancia de nuestro proyecto.

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo obtuvimos excelentes resultados con la máquina de electroerosion comparados con los que obtuvimos con la maquina fresadora CNC, ya que mejoraron considerablemente los tiempos y la reducción de los costos fueron notorios; sin embargo encontramos un pequeño inconveniente al maquinar los pequeños ductos, esto se debe a que el electrodo es una pequeña barra de cobre la cual comienza desbastando uniformemente, sin embargo a medida que se va introduciendo los residuos no tienen manera de desalojar el ducto por lo que comienza a salir por los costados en el instante que comienza a suceder esto las paredes del ducto al contacto con estos residuos se comienzan a erosionar, por lo que no obtenemos un diámetro uniforme, solamente al final del ducto obtenemos la dimensión deseada pero a la entrada las variaciones son muy considerables ya que van desde 0.2-0.5 mm. Una solución que se está proponiendo es conseguir un pequeño ducto de la dimensión deseada y hacer un electrodo de una longitud muy pequeña a este pequeño electrodo proponemos soldarle un pequeña aguja por la cual pretendemos desalojar los residuos, de esta manera el electrodo que será introducido es de una longitud tan pequeña que al contacto con la pared afectara de una manera casi insignificante al ducto; sin embargo esto aun está en proceso y no se han realizado pruebas para fundamentar que esta propuesta funcione.

La utilización de electroerosión para la fabricación de platos bipolares está siendo considerada. Se considera también el diseño de un sistema para el suministro de humedad a la MEA y control de temperatura. Respecto a los recubrimientos se considera el depósito en área grande para obtener platos bipolares de cualquier dimensión.

Como trabajo futuro se plantea el diseño de los orificios para el suministro de los gases reactantes, así mismo los canales de flujo deberán ser investigados con nuevas geometrías donde se pretende usar un método numérico que nos permita saber la distribución de las partículas a través de los canales y de esta manera proceder a maquinarlos esto se pretende hacer a través de un software de simulación de fluidos, figura 8.



**Figura 8. Celda de combustible tipo PEM**

[7] El Fuel Cell Catalyst Boletín trimestral, volumen 5, no. 2, invierno 2005

[8] W. Strauss, S.J. Manwaring, Contaminación del Aire, editorial limusa, 2000

[9] Asociación Mexicana de la Industria Automotriz [www.amia.com.mx](http://www.amia.com.mx)

[10] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) [www.imp.mx/publicaciones/prospectiva](http://www.imp.mx/publicaciones/prospectiva)

## Referencias

[1] W. R. Grove Philos. Mag. S.3 21 140 (1842 Dec.), p.417

[2] Fuel Cells 2003 [worldwide.fuelcells.org/sp\\_base.cgim](http://worldwide.fuelcells.org/sp_base.cgim)

[3] Business Communications Company, Inc <http://www.bccresearch.com/>

[4] DeGarmo. Black Kohser, Materiales y Procesos de Fabricación, pp. 753-845, 1988.

[5] Fondo de Población de las Naciones Unidas (FNUAP) <http://www.unfpa.org/swp/2004/espanol/ch2/>

[6] Agencia Espacial Europea (ESA). [http://www.esa.int/esapub/annuals/annual03/ar3\\_earthob.pdf](http://www.esa.int/esapub/annuals/annual03/ar3_earthob.pdf)