



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

“Diseño y Caracterización de los Campos
de Flujo de una Celda de Combustible”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTAN:

**ARAUJO NIETO JORGE
MUÑOZ BARRERA JESÚS ABRAHAM**

DIRECTORES DE TESIS:

M. I. ANTONIO ZEPEDA SÁNCHEZ
Dr. FRANCISCO J. SOLORIO ORDAZ



MÉXICO, D. F.

2005

m. 344.218



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser nuestra Alma Mater.

A la Facultad de Ingeniería, por la formación profesional e integral que nos ha proporcionado.

Al Centro de Diseño y Manufactura, por los conocimientos y las facilidades otorgadas para la realización de esta tesis.

Al Departamento de Termofluidos, por permitir el uso de las instalaciones y equipo.

Al Laboratorio de Manufactura Avanzada, por su valiosa participación en la realización de este proyecto.

Al CINVESTAV y a la gente que ahí labora por su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo.

A los técnicos de los talleres de Ingeniería Mecánica, por su invaluable ayuda en la creación de los prototipos.

A mis padres Jesús y Cristina por su amor, cariño y sus cuidados desde el inicio de mi vida, nunca dejare de agradecerles todo lo que han hecho por mi nunca los voy a defraudar. Gracias.

A mis hermanos Paco y Cynthia, por su paciencia y compañía a lo largo de este camino que ha alcanzado un escalón de los muchos que nos faltan, vamos hacia adelante. Gracias.

A mis tíos, quienes me brindaron su ayuda siempre que la necesite sin importarles las molestias que causaba. Gracias.

A mis primos (casi mis hermanos), quienes me han alentado y que confiaron en mi. Su apoyo es muy importante para mi. Gracias.

A mis amigos, que por lejos que aparentemente estemos siempre estaremos juntos cuando lo necesitemos sin que importe las distancia entre nosotros. Gracias por su compañía, consejos y ayuda cuando los necesite. Gracias.

A todos mis profesores, en especial al M. I. Antonio Zepeda, al Dr. Francisco Solorio, que me han enseñado tanto y que me han tenido tanta paciencia, Les tengo mucho que aprender. Gracias.

Al M. I. Eduardo Garduño, Ing. Israel Garduño, Dr. Omar Solorza por su valiosa ayuda en la realización de esta tesis.

Si tienes un sueño, corre atrás de él, no dejes que nada te detenga, si tienes un sueño, es porque eres capaz de hacerlo realidad.

JESÚS ABRAHAM MUÑOZ BARRERA

A Dios que me ha enseñado que la belleza de la vida radica en librar las más difíciles pruebas para disfrutar con mayor intensidad de los logros como el ahora conseguido y en especial por mandar a cuidar de mí a un ángel que siempre ha demostrado estar junto a mí en cada momento, mi madre.

A mi mamá, mi ejemplo de integridad, honestidad y humildad y quien me ha demostrado que una mujer puede ser inmensamente más fuerte que un hombre aún estando sola, gracias mamá por todo el cariño y apoyo que he recibido de ti, pero sobretodo te agradezco la amistad y la libertad que me has brindado realizando un enorme esfuerzo para dejarme alcanzar mis sueños. Te adoro.

A mi abuelita Licha por aceptarme en su familia, estando siempre pendiente de mí, cuidándome y dándome su cariño. Te quiero mucho "viejilla".

A mi tío Pepe por enseñarme lo que es un padre de verdad y quererme como si fuera uno más de sus hijos, gracias por hacerme sentir que de todas maneras tengo un padre.

A mis primos a los que siempre tendré presentes como hermanos por todo el apoyo y cariño fraternal que he percibido de ellos.

Y a todas las personas que he conocido a lo largo de mi camino de las cuales he aprendido mucho.

Al M.I. Antonio Zepeda por todas las enseñanzas recibidas, su amistad y por su infinita paciencia.

Al Dr. Francisco Solorio por los conocimientos inculcados no solo en sus materias.

A todos mis amigos que han estado conmigo ofreciéndome su total apoyo.

Jorge Araujo Nieto.

Índice

Introducción.....	2
--------------------------	----------

Antecedentes.....	6
--------------------------	----------

A.1 Historia e investigadores de la tecnología de celdas de combustible y sus aportaciones.....	7
A.2 Funcionamiento general de una celda de combustible.....	10
A.3 Tipos de celdas de combustible.....	11
A.4 Aplicaciones de las celdas de combustible.....	14

Capítulo 1.....	17
------------------------	-----------

Introducción

1.1 ¿ Que es una celda de combustible?.....	18
1.2 Celda de Combustible con Membrana de Intercambio Protónico PEM.....	19
1.3 Partes que conforman una PEM.....	20
1.3.1 Membrana de intercambio protónico.....	20
1.3.2 Difusor de gas.....	22
1.3.3 Electrocatalizador.....	22
1.3.4 Placas colectoras de corriente con campos de flujo de gases.....	25
1.4 Campos de Flujo.....	27
1.4.1 Configuraciones existentes.....	27

1.4.2 Dimensiones de forma geométrica de la sección transversal de los canales.....	28
1.4.3 Área activa.....	30
1.5 Diseños más comunes de campos de flujo, sus ventajas y desventajas.....	31
1.5.1 Campo de flujo con canales rectos y paralelos.....	31
1.5.2 Campo de flujo de serpiente.....	34
1.6 Campo de flujo con diseños biomiméticos.....	36
1.6.1 Biomimética.....	36

Capítulo 2.....38

Introducción

2.1 Proceso de diseño.....	39
2.1.1 Campos de flujo propuestos.....	39
2.2 Proceso de manufactura.....	48

Capítulo 3.....53

Introducción

3.1 Material de los campos de flujo.....	53
3.2 Utilización de aire como fluido de trabajo.....	55
3.3 Caracterización de la Rugosidad.....	56
3.4 Cálculo de la sección transversal de flujo.....	57
3.5 Longitud de Trayectoria Recorrida.....	58
3.6 Visualización de Flujo.....	59
3.7 Implementación del experimento.....	61

3.7.1 Campo Comercial.....	65
3.7.2 Campo Triangular.....	71
3.7.3 Campo Circular.....	74

Capítulo 481

Introducción

Conclusiones.....	88
-------------------	----

Bibliografía.....	90
-------------------	----

Introducción.

Hoy en día, abundan en el mundo muchos productos para la generación “personal” de energía eléctrica, como las baterías y las máquinas de combustión interna. Estos productos, particularmente los dos mencionados, han desarrollado y establecido la infraestructura requerida para su fabricación, su distribución y uso comercial, además de que están cotizadas de acuerdo con su aplicación y por ello se encuentran plenamente disponibles para el usuario.

Sin embargo, existen desventajas en estos productos tradicionales que giran en torno a sus limitaciones prácticas y a su relación con el ambiente. Las celdas de combustible son capaces de aumentar los aspectos positivos de estos, así como de resolver los retos prácticos y ambientales (Cano).

La celda de combustible, como un dispositivo electroquímico que aplica combustible y aire oxidante para producir electricidad, es considerado como una opción no generadora de contaminación del aire y que evita el incremento del efecto invernadero. La celda de combustible tipo PEM, que basa su funcionamiento en la membrana de intercambio protónico, es una alternativa prometedora como planta de potencia limpia debido a su ligereza, baja temperatura de operación, así como alta eficiencia. Sin embargo, uno de los mayores obstáculos para la comercialización de celdas de combustible tipo PEM es su alto costo.

El bloque de celdas de combustible (stack), está compuesto por muchas celdas unitarias, es el núcleo de la planta de potencia. La celda de combustible unitaria se compone de un ensamble de la membrana (MEA membrane electrode assembly por sus siglas en inglés), y dos placas de suministro de gas, las cuales proveen el combustible hidrógeno y el aire oxidante a las celdas. En la actualidad las placas están hechas más comúnmente a través de maquinados controlados numéricamente por computadora (CNC), aunque el moldeado (RIM), prensado y muchos otros métodos de manufactura están siendo desarrollados y probados [Pastula, 1997]. El proceso de maquinado requiere corte, corte en capas, esmerilado y pulido, lo que conduce a altos costos y tiempos de manufactura.

Este alto costo incluyendo proceso de manufactura y materiales representa cerca del 25% del sistema completo de la celda de combustible. En consecuencia, el costo domina el desarrollo de la placa de la celda de combustible. El costo de un nuevo producto se compone del costo de desarrollo y del costo de manufactura.

El propósito del diseño de la configuración de los campos de flujo de las placas bipolares de la celda de combustible, es el de incrementar el

desempeño del suministro de gas dentro de la celda, partiendo del empleo de una sección transversal y un solo tipo de material, establecidos estos desde el principio de la investigación, con el objeto de enfocar el estudio exclusivamente a la caída de presión ocasionado por la geometría de los canales que conforman el campo de flujo en cada una de las alternativas propuestas por los realizadores de este estudio, opciones que surgen además de la creatividad y conocimientos de los participantes, de los estudios realizados dentro del campo de la biomimética, así como dentro de otras áreas del diseño.

El buen desarrollo del experimento proveerá las bases para la búsqueda de la configuración del campo de flujo que presente mejores características, en comparación con las configuraciones resultado de otras investigaciones, primordialmente en el aspecto de caída de presión generada por la forma geométrica de distribución del fluido, implantada al campo de flujo proveedor de los gases necesarios para el proceso electroquímico que se lleva a cabo dentro de la celda, de la misma manera, se buscará encontrar la configuración que ofrezca una mejor cobertura del área de distribución de los gases que se encuentra en contacto directo con la membrana de intercambio protónico. Una vez hallada la mejor alternativa en los parámetros antes descritos, dicho estudio servirá como inicio en la investigación de otras variables de interés, tales como la forma geométrica y el área de la sección transversal de canal, distribución de temperaturas y selección de materiales, entre otros muchos.

El presente trabajo se divide en 4 temas, de tal modo, que en los antecedentes se brinda la información necesaria para comprender el tema tratado.

En el capítulo 1, "La celda de combustible tipo PEM", se muestra el funcionamiento así como también, los partes que componen una celda de combustible además de una breve reseña sobre los campos existentes dentro del tema de celdas de combustible.

El capítulo 2 “Diseño y Manufactura de Campos de Flujo”, describe el proceso de diseño, además del mecanismo de manufactura desarrollado para la creación de los campos de flujo analizados en este trabajo.

El capítulo 3 “Caracterización de los Campos de Flujo”, describe todas las pruebas realizadas y una breve explicación de porque se consideró necesario realizar dicha prueba a cada campo de flujo, así también los resultados obtenidos de dicha experimentación.

Dentro del capítulo 4, “Análisis de resultados”, describe el método de selección utilizado para la decisión final sobre los resultados obtenidos y como es que se evaluaron los resultados finales.

En el apartado de conclusiones, se finaliza el trabajo realizado con los comentarios finales de esta investigación, además de los puntos a considerar para investigaciones futuras dentro del ámbito de las celdas de combustible y en especial de los campos de flujo.

Antecedentes.

Historia de la Celda de Combustible.

Introducción

En esta parte del trabajo se presenta una pequeña introducción sobre el desarrollo de los primeros intentos para desarrollar fuentes de energía alternas, como han ido evolucionando estos, así como sus creadores, y el porque sirvieron como trabajos pioneros para lo que actualmente es el desarrollo de las celdas de combustible. Asimismo, la información que se mencionará, servirá como base para entender mejor este trabajo.

El motivo principal de la búsqueda de nuevos sistemas de conversión de energía es la manera tradicional de aprovechar la energía potencial de los combustibles. Ya que quemándolos la energía térmica producida se convierte en energía mecánica, resulta ser muy poco eficiente. Ése es precisamente el proceso que siguen los motores de combustión interna y también las grandes centrales térmicas. El paso intermedio a través de la energía térmica limita drásticamente la eficiencia, y la limita de forma inherente, debido a las leyes de la termodinámica, sin que ningún proceso de optimización lo pueda corregir.

En una celda de combustible, en cambio, la energía química del "combustible" se convierte directamente en energía eléctrica a través de una reacción electroquímica, sin mediar proceso alguno de "combustión" y su eficiencia llega a alcanzar valores de hasta un 70%.

A.1 Historia e investigadores de la tecnología en celdas de combustible y sus aportaciones

William Robert Grove. El origen de la tecnología de las celdas de combustible se acredita a Sir William Robert Grove (1811-1896). En 1839, el inglés William Grove, jurista de profesión y físico de vocación había hecho público un experimento que demostraba la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de la reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno. Su original experimento consistía en unir en serie cuatro celdas electroquímicas, cada una de las cuales estaba compuesta por un electrodo con hidrógeno y otro con oxígeno, separados por un electrolito (fig a.1). Grove comprobó que la reacción de oxidación del hidrógeno en el electrodo negativo, combinada con la de reducción del oxígeno en el positivo generaba una corriente eléctrica que se podía usar, a su vez, para generar hidrógeno y oxígeno.

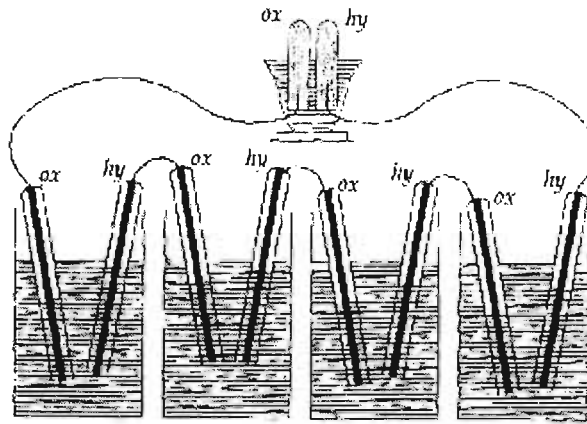


Fig. a.1. Grove usó cuatro celdas grandes, con H₂ y O₂ para producir energía eléctrica que a su vez se podía usar para generar hidrógeno y oxígeno.

A pesar de lo innovador de su experimento, Grove recibió numerosas críticas respecto al hecho de que su celda necesitaba cuatro volúmenes de gases para generar electricidad que genera un solo volumen. Sin embargo, el experimento de Grove mostraba la esencia y el camino. La esencia, la interconvertibilidad entre la energía química de un combustible y la energía eléctrica; el camino, la posibilidad de convertir esa energía directamente en electricidad sin pasar por un proceso intermedio de combustión.

Ludwig Mond (1839-1909) en compañía de su asistente Carl Langer condujeron experimentos con una celda de combustible que producía 6 Amperios por pie cuadrado a 0.73 Voltios. Mond y Langer atravesaron por problemas usando electrolitos líquidos. Como Mond decía "hemos tenido éxito únicamente utilizando un electrolito en una forma cuasi-sólida empapado por un material poroso no conductor, de manera similar a como se ha hecho en las así llamadas pilas y baterías secas". Mond usó un plato de loza saturado con ácido sulfúrico diluido.

Fue **Friedrich Wilhelm Ostwald** (1853-1932), el fundador del campo de la química física, quien determinó experimentalmente la relación entre los diferentes componentes de la celda de combustible, incluyendo los electrodos, electrolito, agentes oxidante y reductor, aniones y cationes. El trabajo de Ostwald abrió

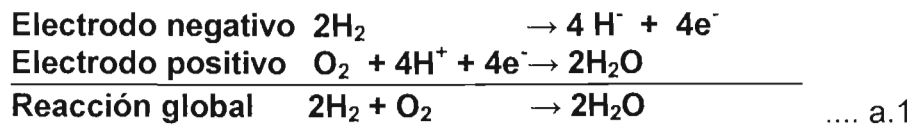
puertas dentro del área de la investigación de las celdas de combustible a modo de suministro de información para investigadores de celdas de combustible.

Durante la primera mitad del siglo veinte, **Emil Baur** (1873-1944) condujo una investigación extensa dentro del área de los dispositivos de celda de combustible de alta temperatura los cuales usaban plata fundida como electrolito. Su trabajo fue llevado a cabo en conjunto con estudiantes en Braunschweig y Zurich.

Francis Thomas Bacon (1904-1992) realizó investigaciones y desarrollos significativos con celdas de combustible de alta temperatura. Bacon tuvo éxito en el desarrollo de una celda de combustible que usaba electrodos de gasa de níquel y operaba a presiones de hasta 3000 psi. El trabajo de Bacon lidereaba en la Segunda Guerra Mundial en su intento de desarrollar una celda de combustible para ser usada en los submarinos de la Marina Real. En 1958, su trabajo condujo hacia el desarrollo de una celda alcalina usando un ensamble de electrodos de 10" de diámetro para la Corporación Británica Nacional de Desarrollo e Investigación. Los desarrollos de Bacon fueron suficientemente exitosos ganando interés de Pratt & Whitney, y su trabajo fue acreditado y usado en las celdas de combustible de la nave espacial Apollo. Tecnología similar está aún siendo usado en naves espaciales.

A. 2 Funcionamiento general de una celda de combustible

El dispositivo es conceptualmente muy simple; una celda de combustible individual, en general, está formada por dos electrodos separados por un electrolito que permite el paso de iones pero no de electrones. En el electrodo negativo tiene lugar la oxidación del combustible (normalmente H_2 aunque puede ser también metanol u otros) y en el positivo la reducción del oxígeno del aire (fórmulas a.1).



Los iones (H^+ en este caso) migran a través del electrolito mientras que los electrones (e^-) circulan a través del circuito externo. Una de estas celdas individuales genera un voltaje cercano a un voltio 1 [V]; para las aplicaciones que requieren mayor voltaje y alta potencia se conectan en serie el número necesario de estas celdas que forman el “stack” de celdas de combustible propiamente dicho.

Existen diversos tipos de celda de combustible, clasificadas de acuerdo con el electrolito empleado y su temperatura de trabajo.

Referencia: <http://www.cienciateca.com/fuelcells.html>

A.3 Tipos de celdas de combustible.

Tabla a.1 Principales Características.

Tipo y Siglas en inglés	Electrolito	Temperatura	Combustible	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Poliméricas (PEM ^a)	Nafion	60-100 ° C	H ₂	transporte equipos portátiles electricidad	baja temperatura, arranque rápido (reduce corrosión, fugas, etc.)	la baja temp. Requiere catalizadores caros (Pt) y H ₂ puro.
Alcalinas (AFC)	KOH (aq.)	90-100 ° C	H ₂	militares espaciales	mejores prestaciones de corriente debido a su rápida reacción catódica.	Requiere eliminar el CO ₂ de aire y combustible.
De ácido fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₄	175-200 ° C	H ₂	electricidad	eficiencia de hasta un 85% (con cogeneración de calor y electricidad). Posibilidad de usar H ₂ impuro como combustible.	Catalizador de Pt. corriente y potencia bajas. peso y tamaño elevados.
De carbonatos fundidos (MCFC)	carbonatos Li, Na, K	600-700° C	H ₂	electricidad	ventajas derivadas de las altas temperaturas	las altas temperaturas aumentan la corrosión y ruptura de componentes

De óxido sólido (SOFC)	(Zr,Y)O ₂	800-1000 ° C	H ₂	electricidad	ventajas derivadas de las altas temperaturas. El electrolito sólido reduce corrosión, fugas, etc.	Las altas temperaturas facilitan la ruptura de componentes (sellos...)
conversión directa de metanol (DMFC)	Nafion®	60-100 ° C	CH ₃ OH	transporte equipos portátiles electricidad	combustible líquido, más cercano a la tecnología actual, más las ventajas de las PEM.	

Ácido fosfórico (PAFC). Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Las Celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia –y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración – comparado con la eficiencia de la máquina de combustión interna. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 205 [° C]. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras.

Carbonato Fundido (MCFC). Las Celdas de combustible de Carbonato Fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 650 [° C]. La primera celda de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California en 1996.

Óxido Sólido (SOFC). Otra Celda de Combustible altamente prometedora, la Celda de combustible de Oxido Sólido, podría ser usada en aplicaciones grandes de alta potencia incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Algunas organizaciones que desarrollan este tipo de celdas de combustible también prevén el uso de estas en vehículos motores. Una prueba de 100kW está siendo terminada en Europa mientras que dos pequeñas unidades de 25kW se encuentran ya en línea en Japón. Un sistema de Óxido Sólido normalmente utiliza un material duro cerámico en lugar de un electrolito líquido permitiendo que la temperatura de operación alcance los 980 [° C]. Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60%. Un tipo de Celda de Combustible de Óxido Sólido utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido semejando la parte superior de una lata de sopa.

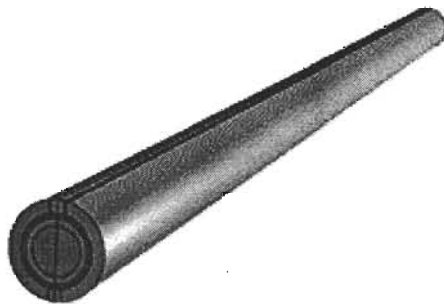


Fig. a.2 Celda de Combustible SOFC cilíndrica

Alcalinas. Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito. Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

Otras Celdas de Combustible. Nuevos miembros de la familia de Celdas de Combustible, tales como las de Metanol Directo, pueden surgir como resultado del presente trabajo llevado a cabo en laboratorios privados y gubernamentales.

Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (PEM). Estas celdas operan a relativamente bajas temperaturas (unos 90[° C]), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como en el caso de automóviles. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, "son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios, y potencialmente para otras aplicaciones mucho más pequeñas como la sustitución de baterías recargables en video cámaras".

A.4 Aplicaciones de las celdas de combustible.

➤ Vehículos Impulsados por Celdas de Combustible

Los vehículos impulsados por celdas de combustible representan una posibilidad muy prometedora para el transporte del futuro. Con mayor alcance y recarga más rápida que los vehículos eléctricos que usan baterías, y sin emisiones aparte del agua pura, estos vehículos tal vez desplazarán algún día a los vehículos de combustión interna que se usan en la actualidad figs a.3 y a.4.

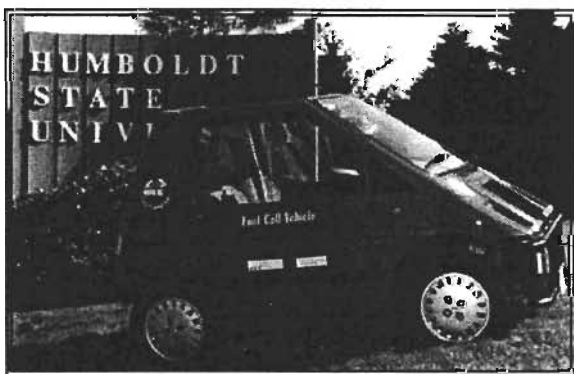


Fig. a.3



Fig. a.4

El Proyecto de Transporte Renovable de Palm Desert® fue establecido para demostrar un sistema completo y práctico de vehículos impulsados por celdas de combustible. Los vehículos mencionados anteriormente son sólo una parte del concepto completo; desde la generación limpia de hidrógeno utilizando módulos solares hasta vehículos impulsados por celdas de combustible sin emisiones en absoluto, este proyecto representará el futuro del transporte actual.

➤ **El Proyecto Stack-in-a-Box™ (Celda de Combustible Portátil)**

La "Stack-in-a-Box™" es una celda de combustible portátil que fue diseñada como fuente de energía para hacer funcionar una máquina de helados, pero se ha usado también para una licuadora, un televisor con videograbadora, y una computadora. El Stack-in-a-Box™ demuestra que las celdas de combustible se operan fácilmente y con seguridad. Algunos estudiantes usan el sistema para enseñar la operación de esta celda de combustible en todo el mundo.

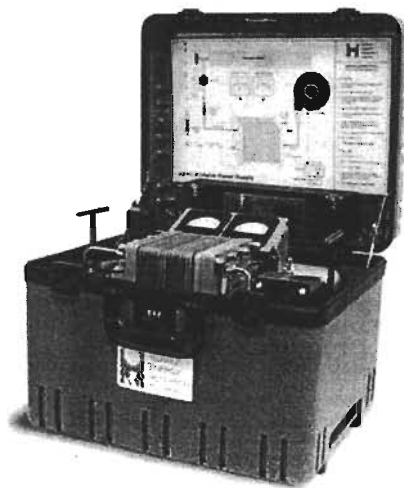


Fig. a.5 Celda de Combustible Portátil (Stack in a Box)

➤ Telecomunicaciones Remotas

Las celdas de combustible pueden proveer energía confiable para operaciones delicadas. El SERC (Centro de Investigación del Medio Ambiente Smith por sus siglas en inglés) ha construido un sistema de celda de combustible que provee energía confiable durante todo el año para una estación de telecomunicaciones en un sitio aislado Fig. a.6. Esta estación provee servicio telefónico para la tribu Yurok en el norte del Estado de California, EAU.

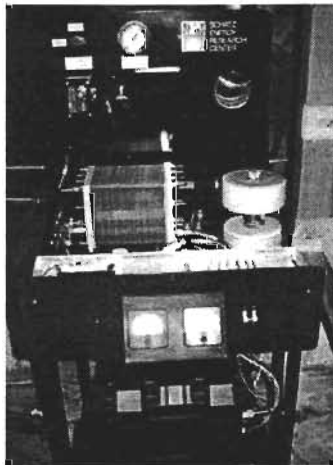


Fig. a.6 Celda de SERC

Capítulo 1

La Celda de Combustible tipo PEM

Introducción.

En esta parte de la investigación se ofrece una breve descripción del funcionamiento de una celda de combustible, las partes que la componen, incluida información acerca de las mismas y la importancia que tienen estas, dentro del proceso de transformación de energía que se lleva a cabo dentro de la celda, así como una reseña acerca de los campos de flujo encontrados dentro de la literatura y que sirven de base para el desarrollo del presente estudio.

1.1 ¿Que es una celda de combustible?

Una celda de combustible es un sistema de generación de energía eléctrica a partir de las reacciones de oxidación de un combustible y la reducción del oxígeno (gas empleado en la mayoría de las celdas de combustible y que en ocasiones es tomado del aire atmosférico). El combustible y el oxígeno son suministrados a la celda de combustible por medio de las placas monopolares, las cuales, a través de los campos de flujo que tienen maquinados en una cara, distribuyen los gases que intervienen dentro de la reacción; por el lado del hidrógeno (ánodo), se lleva a cabo la disociación del combustible separando sus átomos en protones y electrones, mientras que los electrones son aprovechados al circular a través de un circuito externo, los protones cruzan a través de un electrolito para posteriormente entrar en contacto con el oxígeno y los electrones mencionados anteriormente, y con ello tener como productos de la reacción global agua y calor que generalmente es expulsado hacia el exterior de la celda.

Las celdas de combustible surgieron a raíz de la búsqueda de nuevas tecnologías que tienen como principio fundamental, la reducción del impacto de los procesos de transformación de energía hacia el medio ambiente. Este tipo de sistemas forman parte del conjunto de innovaciones primordialmente en el campo de la electricidad, sin duda, la principal tendencia a la que apunta el surgimiento de tecnologías más limpias, movimiento que promueve la eliminación del uso de combustibles fósiles (principalmente), que son los causantes de la mayor parte de la contaminación atmosférica debido a su producción por medio de las fuentes móviles (75%) dentro de las cuales se pueden encontrar como ejemplos a todo tipo de vehículos de transporte y las fuentes fijas (25%) como sería el caso de las calderas y algunos otros sistemas de producción de calor.

1.2 Celda de Combustible con Membrana de Intercambio Protónico.

El componente fundamental de esta celda de combustible consiste de dos electrodos, el ánodo y el cátodo, separados por un electrolito de membrana polimérica. Cada uno de los electrodos está cubierto sobre uno de los lados con una delgada capa de catalizador de platino. Los electrodos, catalizador y membrana juntos, forman el ensamble del electrodo de la membrana.

El combustible hidrógeno se disocia en electrones libres y protones (iones positivos de hidrógeno) ante la presencia del catalizador de platino en el ánodo. Los electrones libres son conducidos en la forma de corriente eléctrica utilizable a través del circuito externo. Los protones migran a través de la membrana hacia el cátodo. En el cátodo, el oxígeno proveniente del aire, los electrones del circuito externo y los protones se combinan para formar agua pura y calor. Una celda individual produce cerca de 0.6 [V] y son combinadas dentro del ensamble de celdas de combustible para proveer la cantidad de potencia eléctrica requerida.

Los gases (hidrógeno y aire) son suministrados a los electrodos a cada lado de la PEM (proton exchange membrane por sus siglas en inglés) a través de canales formados en las placas de campo de flujo. El hidrógeno fluye a través de los canales hacia el ánodo donde el catalizador de platino promueve su separación en protones y electrones. Al lado opuesto de la membrana, el aire fluye a través de los canales hacia el cátodo donde el oxígeno contenido en el aire atrae los protones de hidrógeno a través de la membrana.

Los electrones son capturados como electricidad aprovechable por medio de un circuito externo y se combinan con los protones de hidrógeno y el oxígeno para producir vapor de agua sobre el lado del cátodo. Tal y como se muestra en la figura 1.1, que presenta un conjunto general de una celda unitaria.

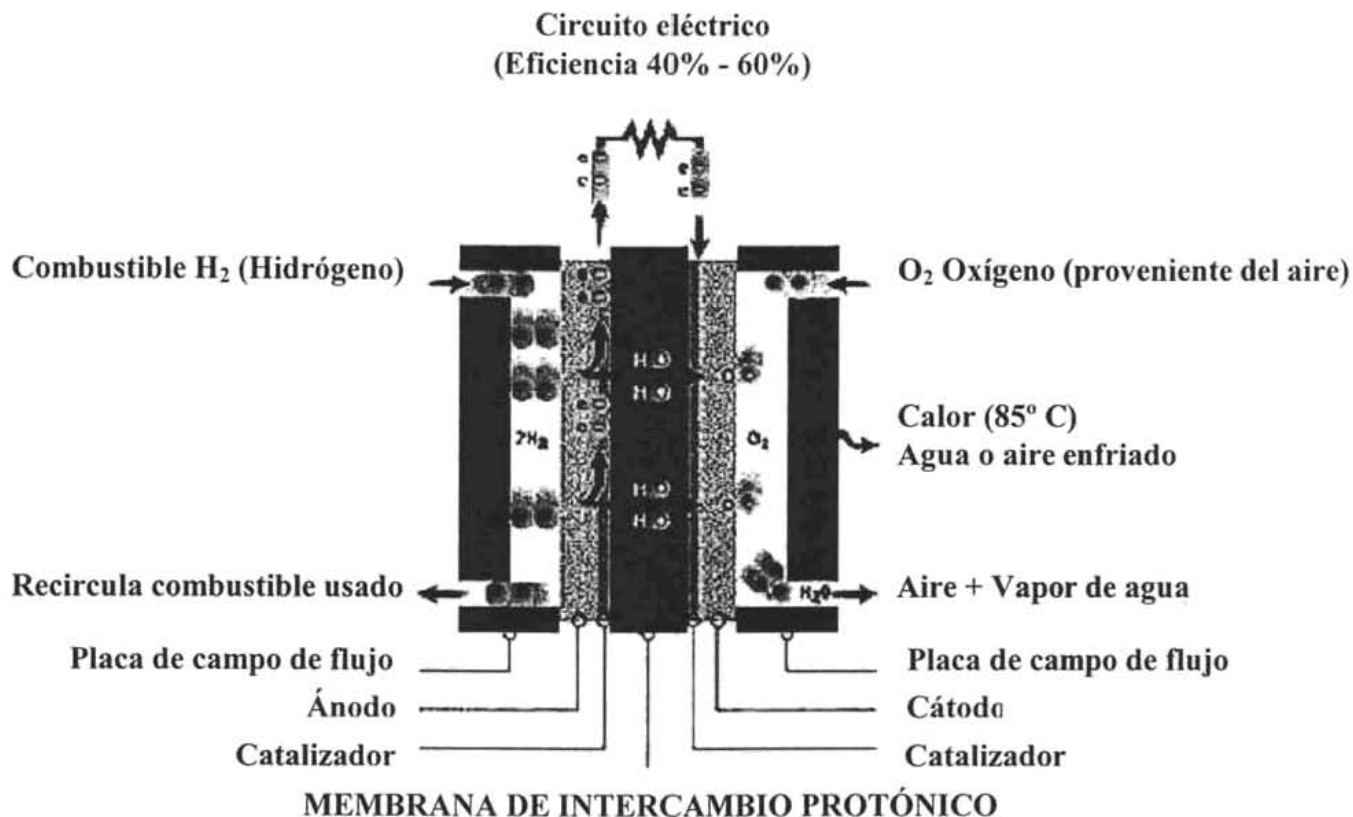


Fig. 1.1 Elementos celda tipo PEM

1.3 Partes que conforman una PEM.

1.3.1 Membrana de intercambio protónico.

La membrana polimérica conductora de protones es quizás el elemento más especial de la celdas PEM. Ésta tiene como función el transporte de carga iónica en el circuito de la celda electroquímica formada. Es el equivalente al ácido sulfúrico en las baterías automotrices, con la ventaja de no ser corrosiva, ser sólida y de fácil manejo, además, tiene otras funciones como la separación de los gases combustible y oxidante y aislar eléctricamente a los dos electrodos. Una característica importante de este material es el hecho de que la membrana debe encontrarse humidificada al punto de saturación para ofrecer las mejores características de conducción protónica. Al inicio debe ser tratada químicamente

para sulfonar al polímero, ya que son los grupos sulfónicos los encargados de intercambiar los protones dentro de la membrana. En los recientes desarrollos tecnológicos de celdas PEM, la membrana utilizada comúnmente es hecha de un ionómero de ácido sulfónico de perfluorocarbono. El material más conocido comercialmente de este tipo de membrana es la Nafion® fabricada por DuPont®. Esta membrana es de un espesor de entre 50 y 175 [μm] pero es un material costoso y son pocas las compañías que pueden ofrecer un producto con las características requeridas por este componente. Otra compañía, Dow Chemical® tiene su propia versión de esta membrana, la XUS 13204.10, reportada como con peso equivalente menor que la Nafion y distancias anion - anion menores, lo que le permite a Dow proveer membranas de hasta 2 milésimas de pulgada de espesor(50.8 [μm]).

Existen grandes esfuerzos por tener la posibilidad de fabricar estas membranas a menores costos o bien mejorar el desempeño de éstas, pues lo que se busca es poder operar a temperaturas superiores a los 80 [$^{\circ}\text{C}$] sin que las membranas sufran deterioro. Otro aspecto interesante por mejorar, es la posibilidad de tener una membrana que no sea permeable al metanol, uno de los combustibles que pueden ser directamente oxidados en el ánodo de una celda PEM y que podría significar la solución para muchos de los retos relacionados con la infraestructura mencionada anteriormente.

Materiales similares están siendo desarrollados en varios laboratorios, entre ellos el de Ballard Advanced Materials Corporation donde se trabaja usando trifluoroestireno, un material más económico (Wilkinson et al., 1997). El Instituto de Investigación en Materiales (IIM) de la UNAM se encuentra muy activo en el desarrollo de polielectrólitos perfluorados tipo Nafion® e, incluso, membranas híbridas orgánicas / inorgánicas que podrían ofrecer muchas ventajas operativas para la celda de combustible (Lichatchev, 2001).

1.3.2 Difusor de gas.

La capa adyacente al electrocatalizador que se halla en contacto con la membrana es el difusor de gas, hecho de tejido de carbón o de papel carbón poroso, que es tratado con politetrafluoroetileno (PTFE) para hacerlo hidrofóbico (repelente al agua) del lado opuesto a la membrana. Esta capa difusora de gas puede llegar a tener espesores del orden de 100 a 300 [μm]. La función de estos componentes es la de permitir un acceso directo y uniforme de los gases reactantes reactivos a la región del catalizador sin que éstos se tengan que difundir a través de capas de agua líquida. El lado hidrofóbico impide el paso de agua líquida desde la membrana hacia el exterior del MEA lo cual podría provocar el taponamiento de los accesos del gas entrante. Otro efecto adicional negativo sería la pérdida excesiva de humedad en la membrana, que requiere estar semisaturada de agua para tener su máxima conductividad iónica. El difusor debe además ser un material altamente conductor y de fácil manejo para la fabricación de las celdas. Este componente, junto con los colectores de corriente, se halla a los lados de los MEA para formar una monocelda. Cuando varias monoceldas se encuentran acopladas en serie (arreglo más común) o paralelo forman una celda de combustible de potencia útil. En la práctica, varias monoceldas son acopladas para obtener el voltaje deseado para cada aplicación, ya que una monocelda genera únicamente alrededor de 0.6 [V].

1.3.3 Electrocatalizador

Volviendo a la parte central de la celda PEM, una capa de electrocatalizador se encuentra adyacente a cada lado de la superficie de la membrana. Este electrocatalizador, normalmente Pt (platino), es aplicado en forma de suspensión, que consiste del propio metal, carbón de alta superficie específica y una solución de una versión soluble de la membrana (solución alcohólica). Este tipo de configuración consiste básicamente de Pt soportado en una estructura conductora de carbón (negro de humo de alta superficie específica, 220 [$\text{cm}^2/\text{gr.}$]). La mezcla

es preparada mediante métodos usados en química coloidal, usando Pt de alrededor de 2 [nm] de diámetro y partículas de carbón de 10 nm de diámetro. Como se vio anteriormente, el Pt/C deberá estar íntimamente intermezclado con el ionómero ya "curado", para proveer suficiente conductividad iónica (protónica) dentro de esta capa. Así, la capa del electrocatalizador puede ser descrita como un material compuesto Pt /C/ ionómero, donde los tres componentes se encuentran uniformemente distribuidos dentro del volumen de dicha capa. Cada vez más se utiliza carbón de alta superficie específica en lugar de negro de carbón, el cual era anteriormente utilizado para la fabricación de celdas PEM, el primero puede proporcionar un desempeño similar en la celda reduciendo la carga de Pt de veinte a cuarenta veces, $4[\text{mg Pt}/\text{cm}^2]$ vs. $0.1[\text{mg Pt}/\text{cm}^2]$ o menor (Fuel Cell Handbook, 2000). Sin embargo, el Pt es considerado como uno de los componentes caros de la celda, aunque avances en la ingeniería del diseño de los electrodos han permitido disminuir la carga del metal empleado, a valores de unas 40 veces, en comparación con los primeros diseños de electrodos que empleaban carbón. Con todo y esta baja en la carga de Pt, es deseable poder contar con alternativas de materiales menos costosos o más abundantes. Por ejemplo, una desventaja en el uso de Pt es su susceptibilidad a la presencia de CO, el cual es adsorbido en su superficie evitando que provea su acción catalizadora a los gases para la generación de electricidad. Es por ello que en celdas PEM, la calidad del hidrógeno alimentado debe mostrar bajos contenidos de CO, debajo de los 10 ppm. Es por esto que los desarrollos en electrocatalizadores se centran en la sustitución del Pt y en el mejor diseño de electrodos porosos de gas. En relación con lo primero, otros materiales electrocatalizadores de tamaño nanoparticulado, a partir de carbonilo o sales de metales de transición y calcogenuros, están siendo probados en México y se han obtenido muy buenos resultados que apuntan a la sustitución del Pt (Solorza, 2001). Por otra parte, la celda deberá tener empaques o sellos que confinen cada compartimiento de la misma, para lo que se usan materiales como teflón o incluso la periferia de la propia membrana es aprovechada para ello. La descripción anteriormente hecha sobre los componentes elementales de una celda de combustible PEM, destaca los

diferentes materiales involucrados y sus características únicas, requeridos para obtener un generador de energía eléctrica de alto desempeño, alta eficiencia de conversión energética y una operación estable duradera. En lo que se refiere a la ingeniería de la fabricación de los electrodos, en el IIE se ha explorado el uso de técnicas de impedancia para la determinación de la contribución de la estructura porosa del electrodo al desempeño electroquímico y, por lo tanto, eficiencia del mismo (Ojeda et al.,2000). Así, aun cuando la tecnología de celdas de combustible ha demostrado un atractivo desempeño (95% de disponibilidad de las celdas comercialmente más desarrolladas) y éxito comercial con unidades operando más de 49,000 horas, factores como el impulso al desarrollo de infraestructura para el uso del combustible hidrógeno y el desarrollo propio de celdas de combustible y sus componentes (Innovation Forecast of Fuel Cells, 1998), brindan una mejor plataforma para hacer realidad el deseo de tener una tecnología eficiente y limpia al alcance de nuestra sociedad. Las expectativas de muy bajas emisiones y altas eficiencias han sido ya demostradas en plantas de potencia y en algunas aplicaciones de celdas de combustible. La flexibilidad del combustible primario también ha sido demostrada con el uso de hidrógeno, gas natural, propano, gas de rellenos sanitarios, digestores anaeróbicos entre otros, con lo que se expande grandemente las oportunidades de mercado. Tal vez sean los gobiernos quienes habrán de contribuir con los mayores esfuerzos iniciales en ambos rubros de desarrollo de infraestructura y tecnología propia para cada país, esto siempre en estrecha colaboración con instituciones de investigación y académicas.

1.3.4. Placas colectoras de corriente con campos de flujo de gases.

Una monocelda estará completa cuando se integren placas colectoras de corriente a un MEA. Las placas colectoras de corriente son precisamente quienes reúnen la corriente generada en todos los puntos de reacción a ambos lados de la membrana, es decir, en los electrodos y que es transferida mediante los difusores de gas. Las placas colectoras de corriente son maquinadas para contener canales o campos por donde fluyan los gases que deberán ser efectivamente distribuidos por los difusores de gas. Estas placas, tradicionalmente hechas de grafito de alta densidad bañado en un material resinoso, operan en modo bipolar en monoceldas acopladas en serie en cuyo caso tendrán maquinadas ambas caras. Esta placa tendrá que ser, por lo tanto, impermeable a ambos gases, hidrógeno y oxígeno.

Este componente de la celda, es generalmente caro por su fabricación e ingeniería. Sin embargo, los materiales empleados para su manufactura no son costosos y su desarrollo puede ser realizado en México si se invierten esfuerzos en ello. El IIE ha ya explorado la posibilidad de tal desarrollo (Cano y Rejón, 2001).

Tabla 1.1 Comparación de materiales en base a sus propiedades.

Comparación de algunas propiedades colectoras de corriente				
Propiedad	PEMTEX	BMC	IIE	EBOMEX
Conductividad[s/cm]	85-96	45	0,07	1,0 - 5,0
Transición Vitrea [° C]	175-185	180	177-180	-
Esfuerzo a la flexión [psi]	3500-6500	7300	más 7300	

En la tabla 1.1 se muestran las propiedades de tal material, en donde la conductividad puede ser fácilmente acrecentada uno o dos órdenes de magnitud, con el uso de mejores carbones para su preparación. Así, este componente debe ser altamente conductor, tener buenas propiedades mecánicas ya que es, en gran

medida, la estructura soporte de la celda de combustible; pues tanto las membranas como los difusores de gases, son materiales flexibles y no pueden soportar peso ni esfuerzos de un arreglo de varias monoceldas. Además, este componente debe ser fácilmente maquinable para su manufactura y maquinado de campos de flujo de gases, o bien, tener propiedades adecuadas para su vaciado por moldeo. Aspectos relevantes para la producción en masa y comercialización de celdas tipo PEM.

Las partes que conforman a una celda de combustible del tipo PEM, mencionadas anteriormente, se muestran esquemáticamente en la figura 1.2.

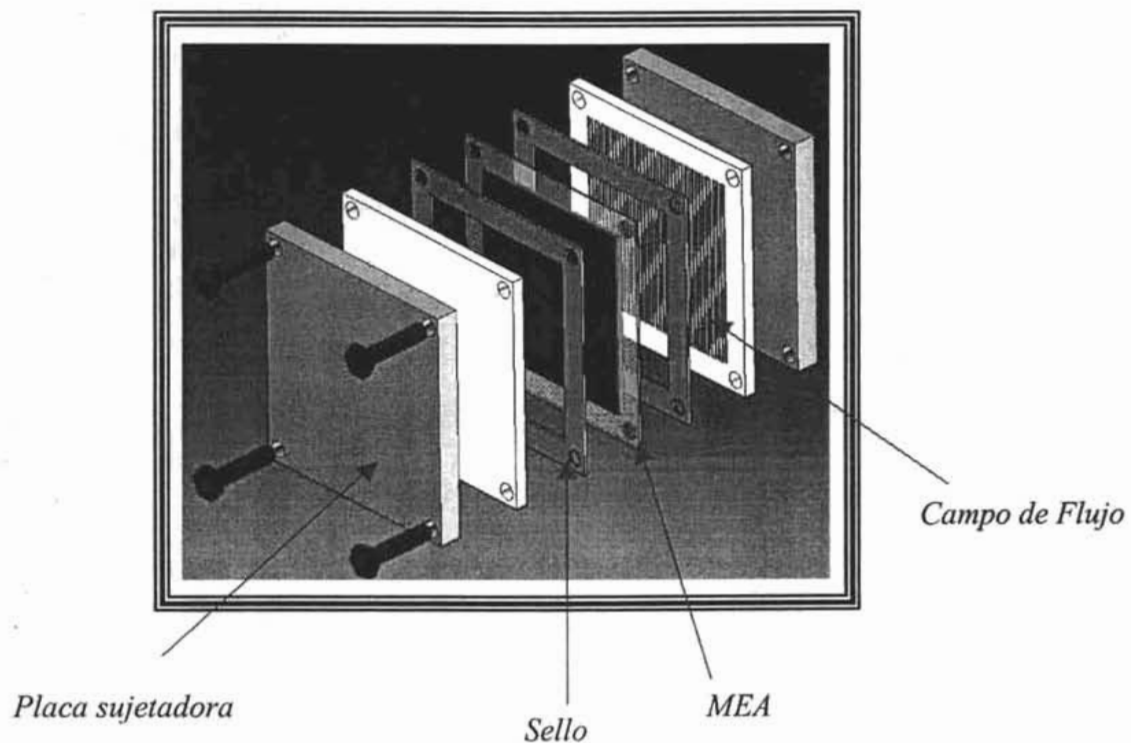


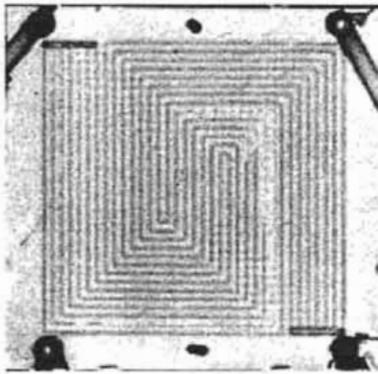
Fig. 1.2 Esquema de los componentes de una celda de combustible

La figura 1.2 muestra en esquema del acomodo (ensamble) de los componentes anteriormente mencionados.

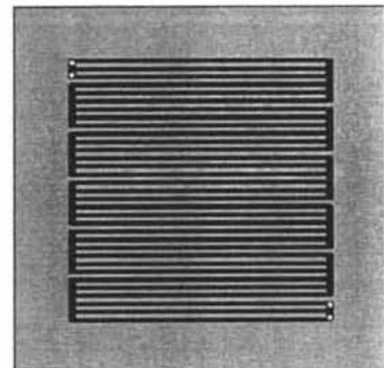
1.4 Campos de flujo.

1.4.1 Configuraciones existentes.

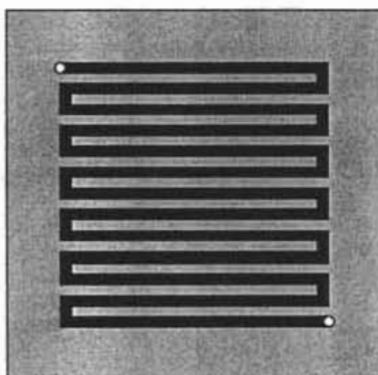
Las características que poseen los campos de flujo existentes son muy similares entre sí, es decir, tales campos siguen un mismo patrón de serpentin con cambios de dirección a ángulos de 90° , lo cual repercute en caídas muy grandes de presión total como se muestra en las figuras 1.3.



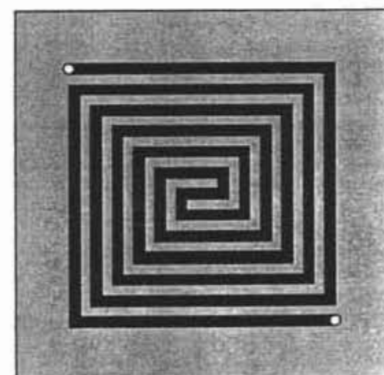
a) Campo propuesto por Geiger, Lehman, Séller.



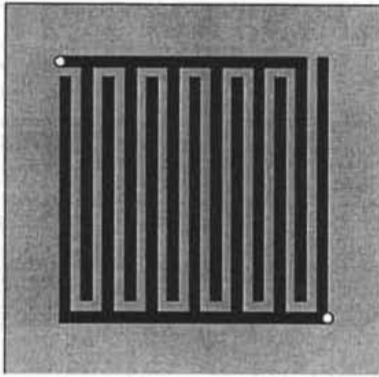
b) Campo Global Tech.®
Geometría original.



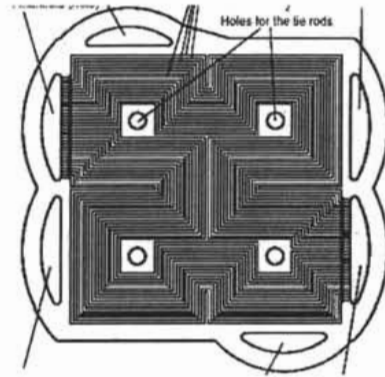
c) Geometría de Serpentin.



d) Campo GT® espiral



e) Campo de canales discontinuos.



f) Modelo Pykkänen Sherer

Fig. 1.3 Campo de flujo comerciales

1.4.2 Dimensiones y forma geométrica de la sección transversal de los canales.

Las dimensiones de la sección transversal de los canales de los campos de flujo oscilan entre 0.8 y 1 [mm] de ancho y alrededor de 1 [mm] de profundidad, estos valores han surgido como resultado de diversos estudios enfocados especialmente en este aspecto tal y como se reporta en el artículo titulado "FINITE ELEMENT STRUCTURE DESIGN OF FUEL CELL PLATE" publicado por Rong Zheng, Zuomin Dong del Institute for Integrated Energy Systems de la Universidad de Virginia en donde además se documenta la investigación realizada acerca de las propiedades mecánicas que deben poseer los materiales para su utilización en la manufactura de las placas bipolares. En lo referente a las dimensiones de los canales, en este artículo se exponen los siguientes valores como resultado de un análisis lineal de elemento finito: espesor de pared (entre canal y canal) $W = 0.00179$ [m] y espesor de la capa impresa $H = 0.00199$ [m]. Fig. 1.4.

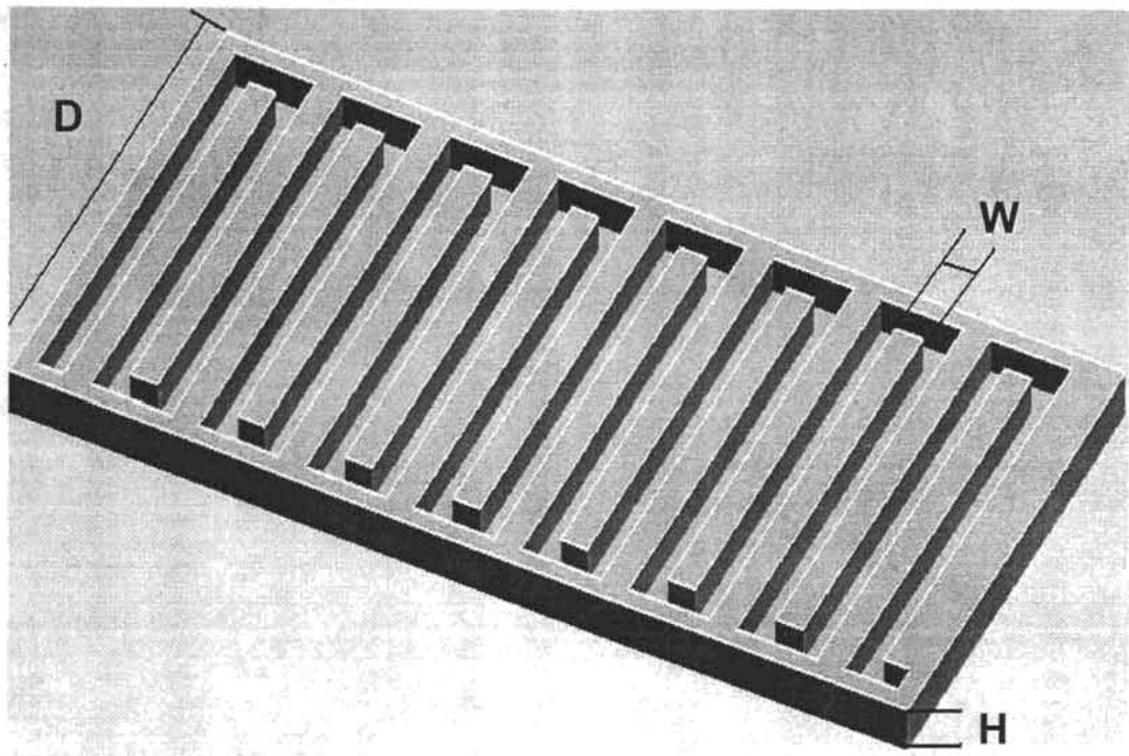


Fig. 1.4 Diagrama de campos de flujo obtenido del análisis

Los canales de flujo de fluido son típicamente rectangulares en su sección transversal, aún otras configuraciones pensadas como trapezoidales, triangular, semicircular, etc. han sido exploradas. Las dimensiones del canal de flujo varían desde una fracción de milímetro a cerca de 2 [mm] en ancho y profundidad como límite inferior para una pérdida de presión razonable debida a pérdidas por fricción.

Los resultados de simulación para valores de profundidad de canal, ancho y base han sido reportados como cercanos a 1.5, 1.5, y 0.5 [mm], respectivamente. La reducción del ancho de base incrementará la concentración de hidrógeno en el ánodo, y las secciones transversales triangular y hemisférica tienen ancho de base cercana a cero. En la práctica esas sugerencias de diseño tienen también limitaciones, por ejemplo el diseño con ancho de base cercana a cero o triangular puede romper el MEA en las áreas de contacto de alta presión lo que dificulta la colección de corriente.

1.4.3 Área activa.

El área que se busca cubrir con los campos de flujo varía de 25 a 49 [cm²], valores que cambian dependiendo de la forma geométrica que tienen los campos de flujo en cuanto a tamaño se refiere, debido a que existen campos de flujo que posee formas geométricas diversas, variaciones que se muestran en las figuras 1.5, 1.6, cabe mencionar que estos valores fueron seleccionados con fines prácticos y de ahorro de material en su manufactura.

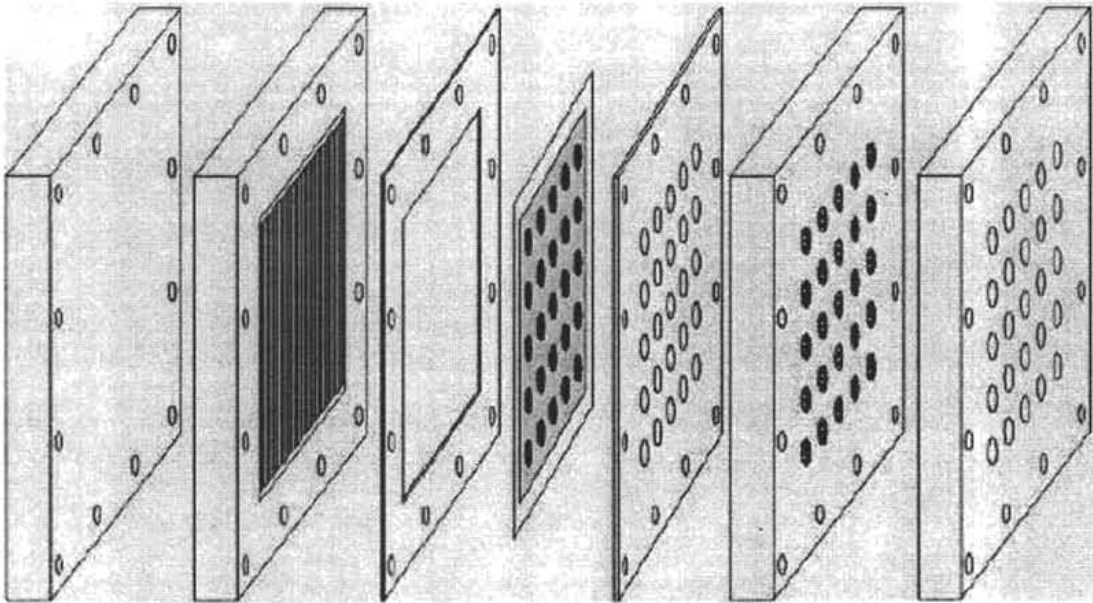


Fig. 1.5 Ensamble de celda con ampo de flujo tipo comercial.

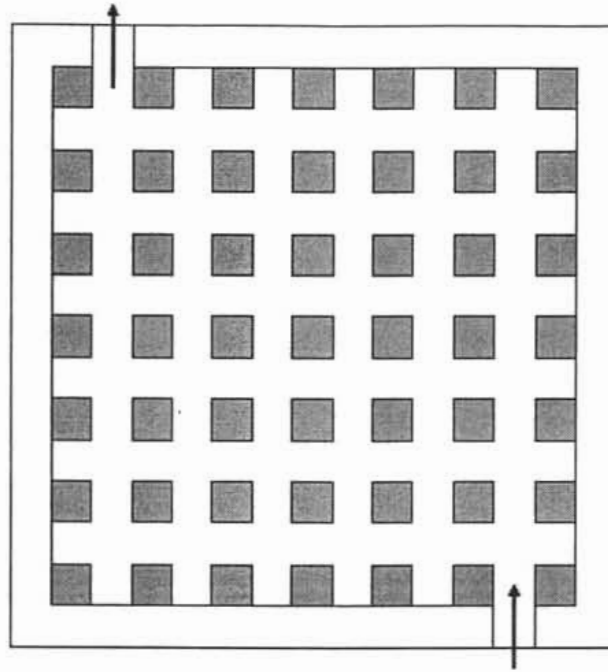


Fig. 1.6 Campo de flujo tipo “postes”

Las topologías pueden incluir campos de flujo rectos, de serpentín o interdigitados, múltiples de distribución internos, humidificación interna, y enfriamiento interno.

1.5 Diseños más comunes de campos de flujo, sus ventajas y desventajas.

1.5.1 Campo de flujo con canales rectos y paralelos.

En este tipo de campos de flujo, debido a su forma y según la celda de combustible opera continuamente, el agua formada en el cátodo se acumula en los canales de flujo adyacentes al cátodo, los canales se mojan, y el agua por consiguiente tiende a adherirse a los lados y a la parte más baja de los canales. Se requiere una fuerza para mover la gotas a través del canal y salir de la celda, la cual se incrementa con el número y tamaño de las gotas. Como el número y

tamaño de las gotas de agua dentro de los canales paralelos son diferentes, el gas reactante fluye preferentemente a través de los canales menos obstruidos.

En consecuencia, las áreas de estancamiento tienden a formarse en varias áreas a través de la placa. De aquí que el pobre desempeño de la celda crece a partir del inadecuado drenaje y la pobre distribución del flujo de gas por el lado del cátodo. Este problema es similar a uno que ocurre en el campo de flujo de tipo de postes.

Otro problema asociado con este diseño es que los canales rectos y paralelos en las placas bipolares tienden a ser relativamente cortos y no tienen cambios direccionales. Como consecuencia, el gas reactante tiene una caída de presión muy pequeña a lo largo de esos canales, y la caída de presión en el múltiple de distribución y en el sistema de bombeo, la cual es normal a las placas bipolares, tiende a ser grande en comparación a la interna. Esta inadecuada distribución de pérdida de presión resulta en una distribución de gases reactantes no uniforme entre varias celdas activas dentro del stack (conjunto de celdas), usualmente las primeras celdas cerca del múltiple de entrada tienen más flujo que aquellas hacia la porción final del múltiple de entrada. Una posible solución es localizar artificialmente algunas restricciones a la entrada y salida de esos canales de flujo paralelo para incrementar la caída de presión en los canales y de aquí mejorar la distribución de flujo entre las celdas activas. Sin embargo, esto complica el diseño y fabricación, por consiguiente el costo. En las figuras (1.7 y 1.8 se muestran dos configuraciones que emplean el patrón de canales rectos.

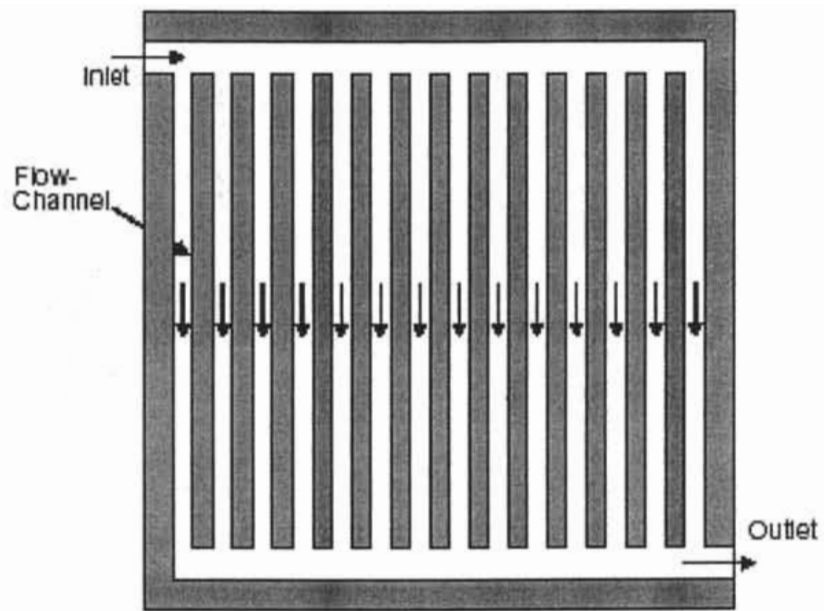


Fig.1.7 Campo de flujo recto y paralelo

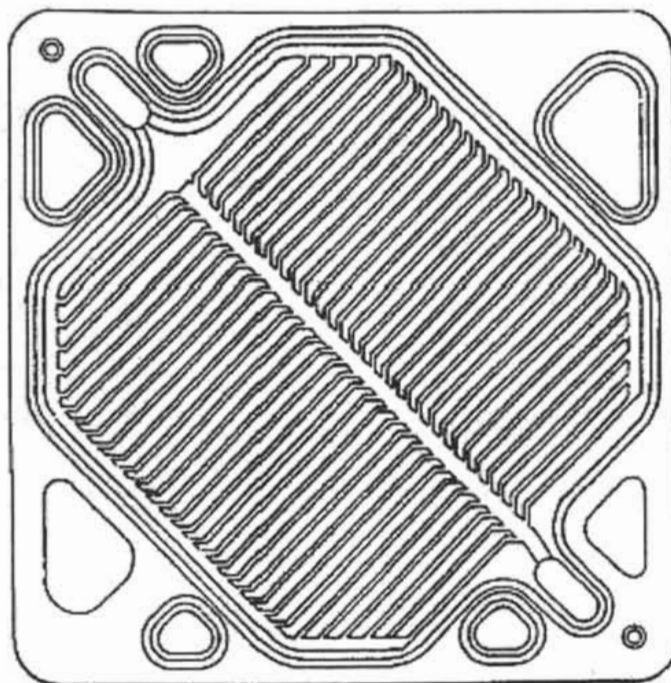


Fig. 1.8 Variación de configuración de campo de flujo recto y paralelo.

1.5.2 Campo de flujo de serpentín.

El campo de flujo de serpentín unitario fuerza al flujo reactante a cruzar el área activa entera del electrodo correspondiente, a la vez de eliminar áreas de estancamiento del flujo. Sin embargo, esta presentación de canal resulta en una trayectoria relativamente larga de flujo reactante, de esto una caída substancial de presión y gradientes de concentración significativos desde la entrada del flujo hasta la salida. En adición, el uso de un solo canal para coleccionar toda el agua líquida producida a partir de la reacción en el electrodo puede promover la inundación del serpentín unitario, especialmente a altas densidades de corriente. De aquí que, para la operación de una densidad de corriente más alta, especialmente cuando se usa aire como oxidante o con placas de campo de flujo muy grandes, Watkins et al. [13] señaló que se pueden usar muchos canales de flujo continuos separados para limitar la caída de presión y por consiguiente minimizar la potencia parásita requerida para presurizar el aire, la cual puede ser tanto como del 30% de la potencia de salida del stack. (8)

Watkins reportó que bajo las mismas condiciones experimentales, la potencia de salida de la celda puede incrementarse casi un 50% con este nuevo tipo de placas de campo de flujo. Aunque los diseños de campo de flujo de serpentín múltiple de este tipo reducen la caída de presión reactante en comparación con los diseños de campo de flujo de serpentín individual, la caída de presión reactante a través de cada uno de los serpentines permanece relativamente alta debido a la trayectoria de flujo comparativamente larga de cada canal de serpentín, por consiguiente la concentración del reactante cambia significativamente de la región de entrada de flujo a la región de salida para cada celda activa.

Aunque la pérdida de presión reactante a través de los campos de distribución de flujo incrementa la carga parásita y el grado de dificultad para la

recirculación del hidrógeno, éstas actualmente son de ayuda para la remoción del agua producto en forma de vapor. (9)

De aquí que, la pérdida de presión total a lo largo de un canal de flujo incrementará la cantidad de vapor de agua que puede ser acarreada o llevada por una cantidad dada del flujo de gas reactante si se mantiene la humedad relativa. De hecho, una pérdida de presión suficiente en los canales de flujo del ánodo pueden aún drenar agua a través de la membrana desde el lado del cátodo, y remover el exceso de agua por el vapor del ánodo, tal que el desempeño de la celda de combustible a operaciones de alta corriente puede ser incrementado significativamente, como lo demostrado por Voss y Chow [19].

Sin embargo, si se incrementa la temperatura del gas reactante a lo largo de la dirección del flujo desde la entrada hasta la salida de la celda de combustible, la capacidad de absorber agua del vapor de gas también se incrementa. (10)

En la figura 1.9 se puede observar una de las múltiples configuraciones de campo de flujo con forma de serpentín.

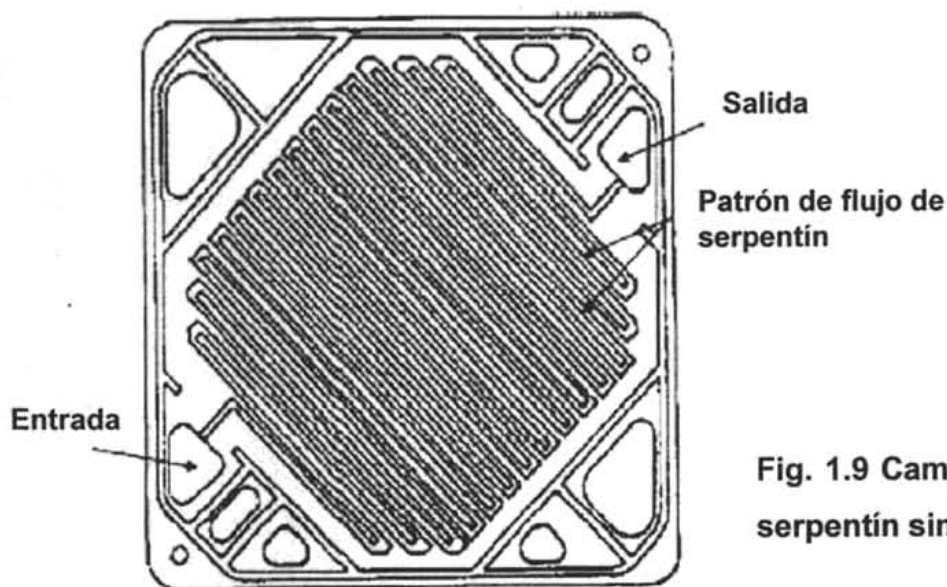


Fig. 1.9 Campo de flujo con serpentín simple.

1.6 Campos de flujo con diseños biomiméticos.

1.6.1 Biomimética.

A grandes rasgos, la biomimética es la ciencia que se encarga del estudio de las estructuras naturales y su aplicación a sistemas mecánicos, arquitectónicos, etc; con la finalidad de aprovechar sus ventajas adecuándolas a la solución de problemas específicos. Del mismo modo que a cualquier otro sistema mecánico, el campo de la biomimética ha proporcionado diversas fuentes de inspiración en el desarrollo de nuevas configuraciones de campo de flujo tomando rasgos característicos de las ramificaciones de las hojas las cuales distribuyen los nutrientes dentro de las plantas.

La tecnología "biomimética" patentada de placas bipolares desarrollada por MFC (Morgan Fuel Cell®) dibuja su inspiración del mundo natural [37]. Esta imita la estructura vista en los pulmones animales y tejidos de las plantas para permitir a los gases fluir a través de la placa de una manera más eficiente que la que se ha alcanzado. Observando cómo los pulmones animales y las hojas de las plantas "respiran", una estructura consistente de canales de distribución largos alimentando progresivamente a las capilaridades más pequeñas es la manera más eficiente para distribuir los reactante, como se muestra en la figura 1.10 esta estructura reduce la caída de presión encontrada en el diseño industrial estándar de campo de flujo de serpentín y asegura una aún mayor provisión de gas a través de la placa bipolar, tal que se puede extraer más potencia de la celda de combustible. Los resultados iniciales son muy promisorios, con pruebas confirmando ya un 16% de incremento en la potencia pico [37].

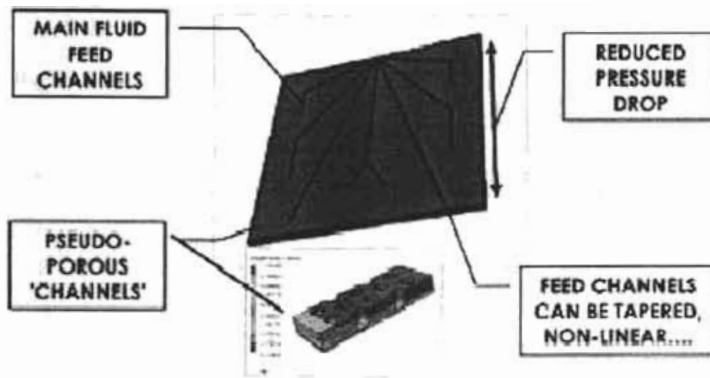


Fig. 1.10 Campo de flujo biomimético de MFC.

En la figura 1.11 se muestra una placa con una topología de campo de flujo basado en la red de distribución de los nutrientes de una hoja.

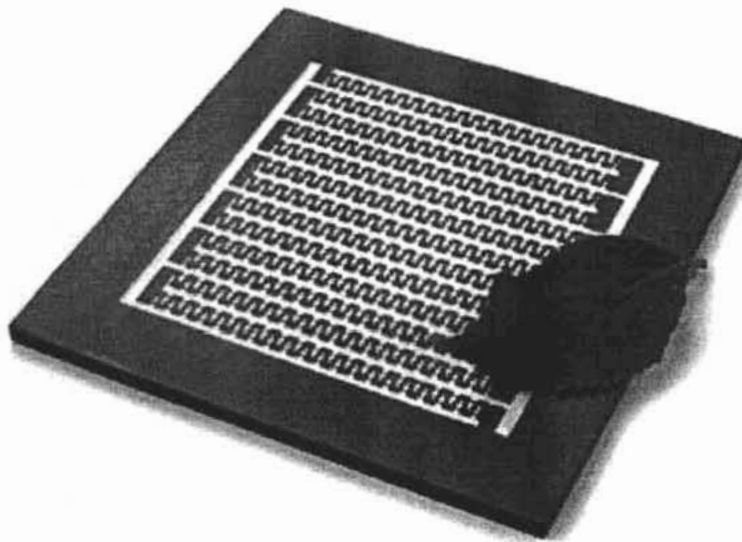


Fig. 1.11 Placa en grafito con campo biomimético MFC.

Capítulo 2

Diseño y Manufactura de Campos de Flujo.

Introducción.

En este capítulo se mencionará el proceso de diseño desarrollado para este estudio donde se incluye el modelado de las placas bipolares con la utilización de diferentes herramientas (software)

2.1 Proceso de diseño.

2.1.1 Campos de flujo propuestos.

Las configuraciones de los campos de flujo propuestos surgieron a partir de ideas propias de los realizadores del presente estudio, tomando en cuenta características básicas y necesarias para el proceso de transformación de energía, las cuales son:

- Promover un tiempo lo más prolongado posible de estancia de los gases que intervienen en la reacción, para con ello desperdiciar la menor cantidad de gas (principalmente el hidrógeno), y prescindir asimismo de la necesidad de implantar sistemas adicionales de recirculación del gas.
- Obtener el mayor porcentaje posible de área cubierta que se encuentra en contacto directo con el ensamble de la membrana de intercambio protónico (MEA según sus siglas en inglés).
- Reducir la caída de presión ocasionada por los cambios de dirección propios de la geometría de los campos de flujo existentes comercialmente y de las diversas propuestas en sí.

Para cumplir con el primer punto se buscó crear campos de flujo que contaran con trayectorias que favorecieran un mayor tiempo de estancia del gas dentro de los canales, logrando esto por medio de establecer un recorrido más largo que el que representaría el empleo de una trayectoria recta, en este sentido se contempló la utilización de trayectorias curvas tal y como se muestra en las figuras 2.1 y 2.2, las cuales muestran ideas propias con claras tendencias a presentar configuraciones circulares.

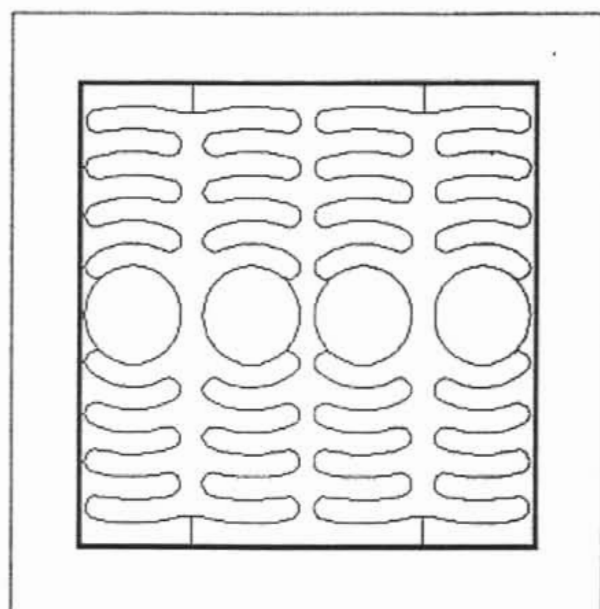


Fig. 2.1 Campo de flujo basado en trayectorias curvas.

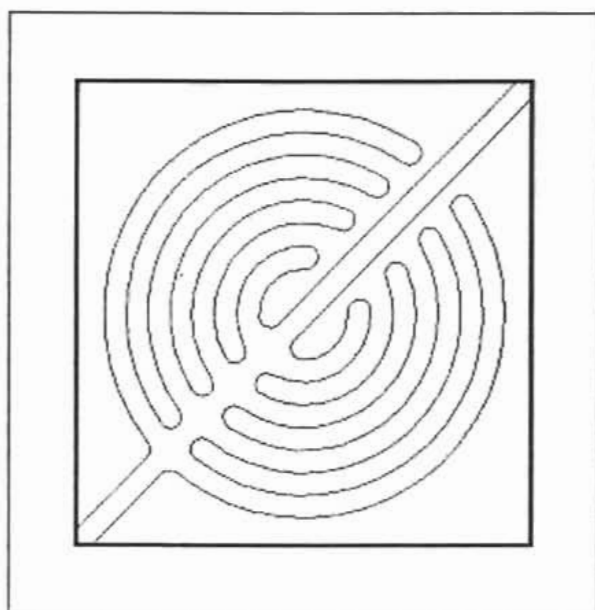


Fig. 2.2 Campo de flujo con trayectorias circulares.

El segundo aspecto a considerar es el porcentaje de área cubierta, estableciendo como área de referencia una cara cuadrada de 49 cm^2 de acuerdo a lo reportado en la literatura, área que se encuentra representada dentro de las propuestas por un cuadro con línea más ancha; con base en esto, se efectuaron otras propuestas además de servir tal peculiaridad como criterio de selección para las mismas.

Algunas propuestas establecidas con las que se busca satisfacer lo anterior son las mostradas en las figuras 2.3 y 2.4.

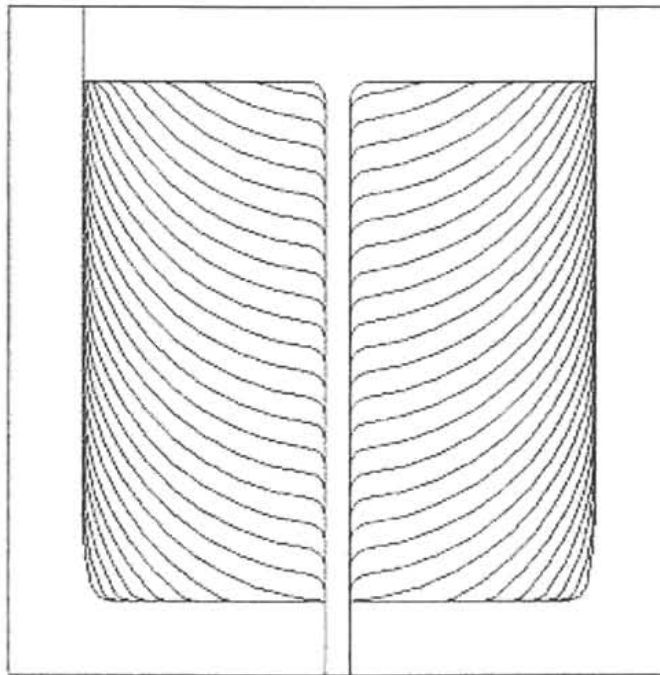


Fig. 2.3 Campo de flujo con área de cobertura cercana a 49 cm^2 .

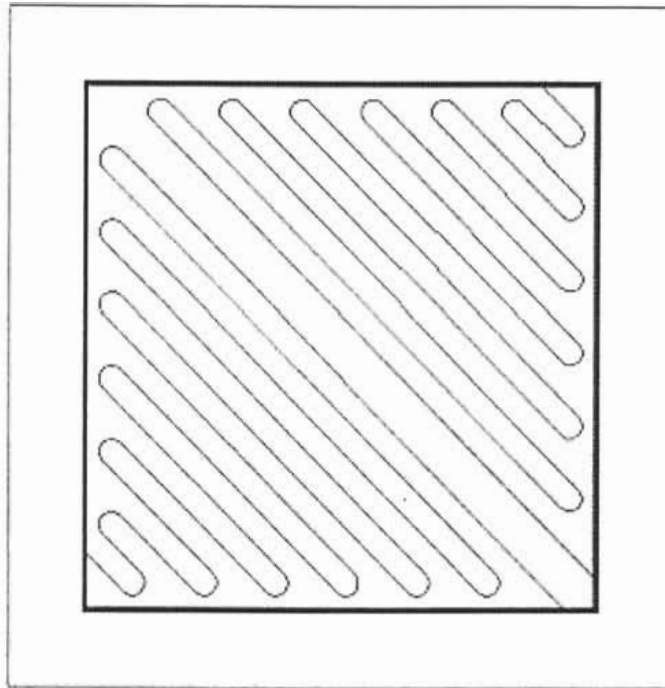


Fig. 2.4 Campo de flujo diagonal con área de cobertura cercana a 49 cm².

La tercer característica a tomar en cuenta es la más importante en la realización del presente estudio. Para cumplir con tal propósito la primera alternativa hallada fue la de "suavizar" los cambios de dirección, ya que como se puede observar en la figura 2.5, que muestra la geometría del campo de flujo utilizada comercialmente, los cambios de dirección se efectúan modificando el ángulo de flujo de 0 a 90° súbitamente, situación que no ocurre dentro de las geometrías propuestas según se hace notar en la figura 2.6.

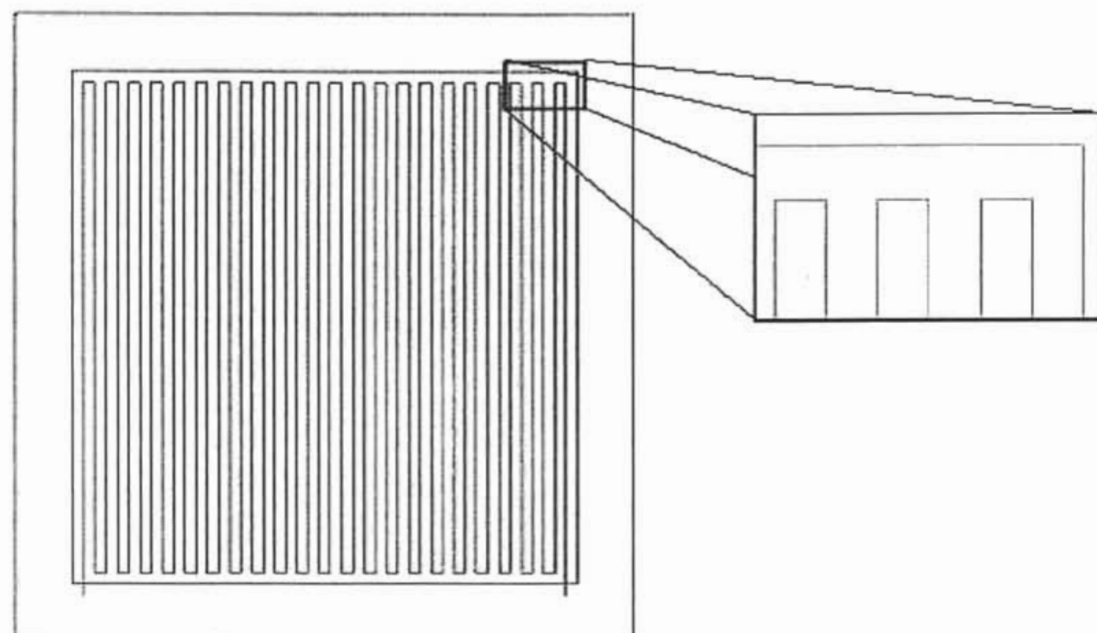


Fig. 2.5 Campo de flujo comercial.

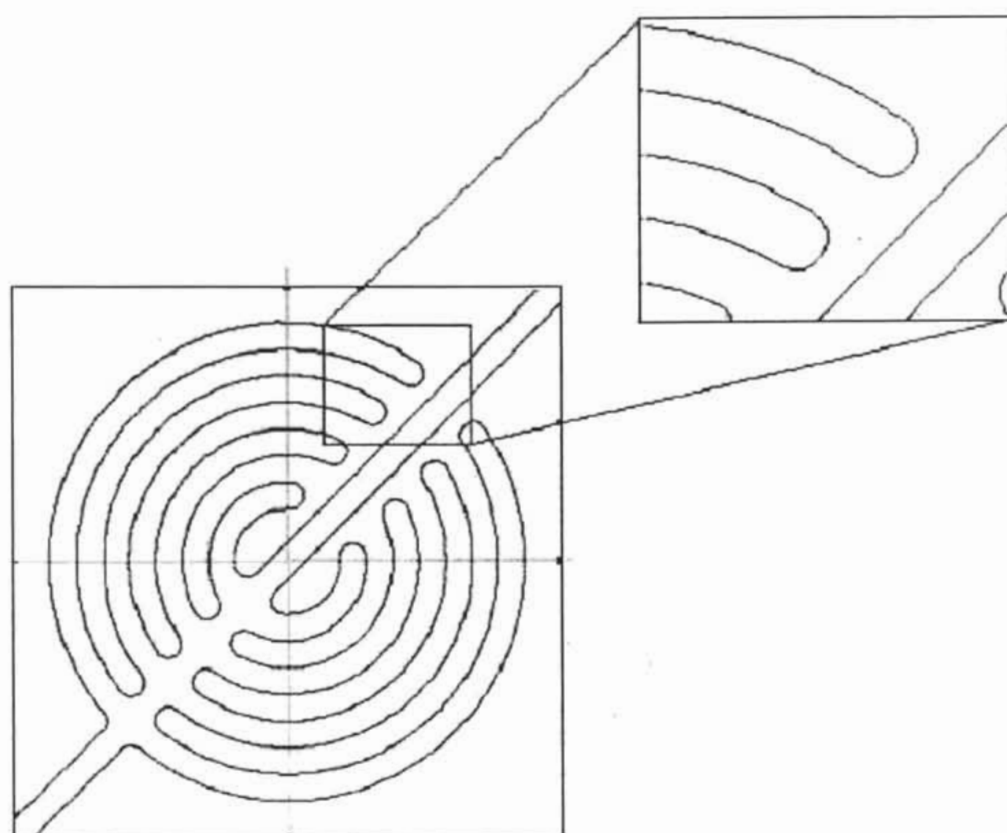


Fig. 2.6 Campo propuesto en el que se presentan modificaciones.

Para la realización de los campos de flujo propuestos se emplearon diversas herramientas de modelado por computadora tales como Mechanical Desktop 6[®], Mastercam 9[®] y Unigraphics NX V2.0[®].

El programa llamado Mechanical Desktop 6[®] se utilizó para el diseño de las trayectorias de los campos de flujo, este paquete permitió además modificar los parámetros de relevancia para la configuración de cada uno de los campos, tales como longitudes de trayectoria, ángulos de cambio de dirección, radios de curvatura en dichos cambios de dirección, separación entre canales (lo que repercute en el espesor de la pared entre los canales, la cual se reporta en la literatura como de 1 [mm]) y área de cobertura, figura 2.7.

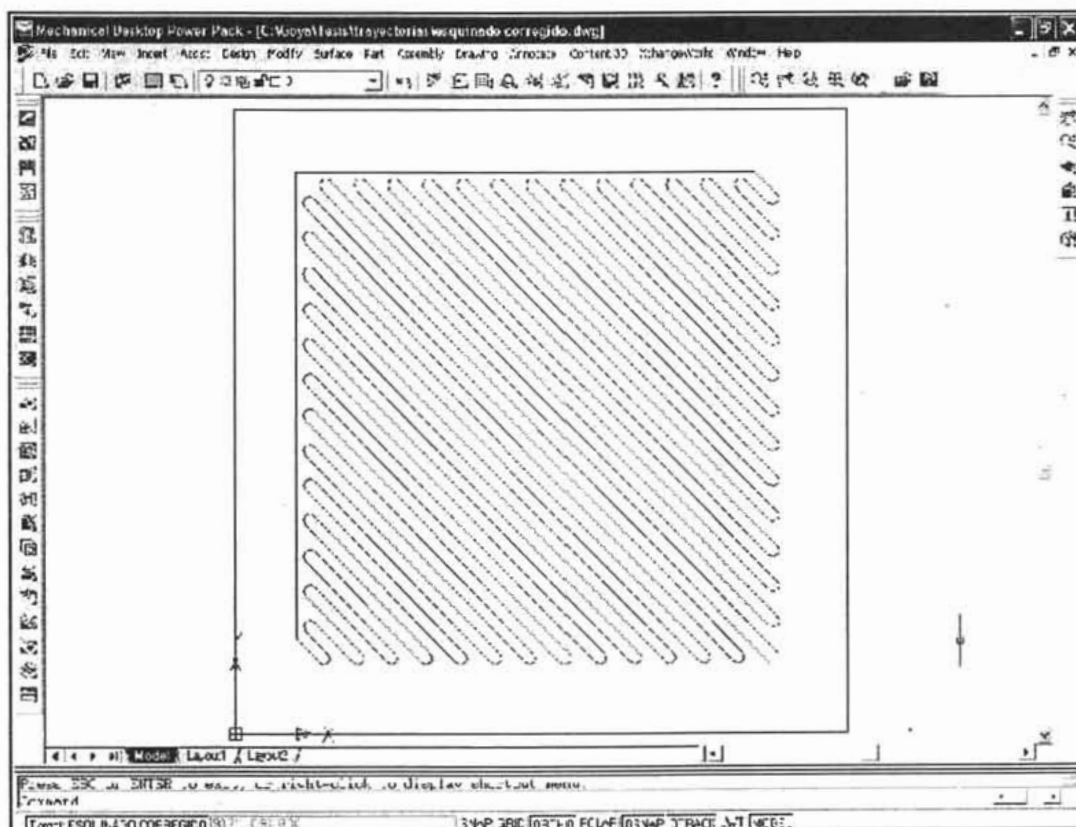


Fig. 2.7 Campo de flujo dibujado en Mechanical Desktop 6[®].

Una vez creados los dibujos de los campos de flujo, éstos fueron usados dentro del software denominado Mastercam 9 ® para emular las trayectorias que seguiría la herramienta durante el proceso de maquinado mediante la utilización de una máquina de CNC, con la cual se manufacturaron las placas de acrílico que sirvieron para implementar el experimento que se describirá en el capítulo 3 de este documento. Gracias al empleo del mencionado paquete, se pudo obtener una simulación de la manera en la que serían manufacturados los campos de flujo, así como el código numérico del programa que se introduciría dentro de la máquina controlada numéricamente por computadora (CNC) para finalmente maquinar los canales de los campos de flujo, todo ello teniendo en cuenta los parámetros de corte necesarios para el correcto proceso de manufactura, tales como la velocidad de giro del husillo, avance por revolución de la herramienta, entre otros, Fig. 2.8.

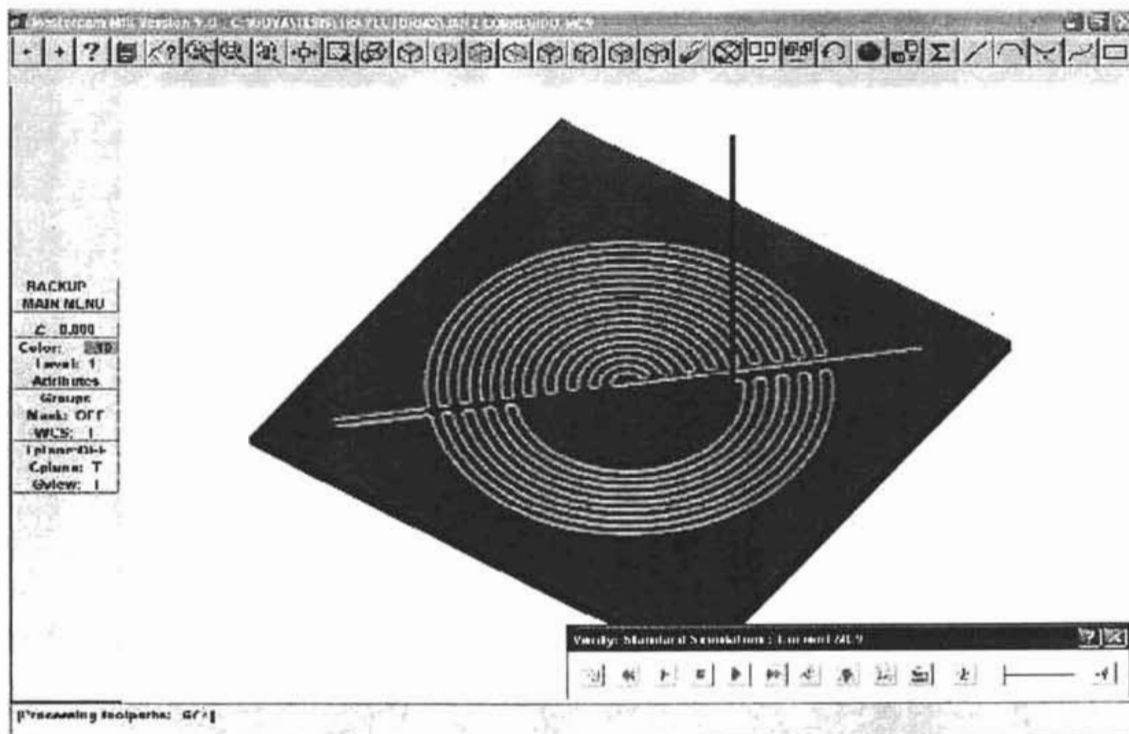


Fig. 2.8 Simulación de maquinado en Mastercam 9 ®.

Con el uso de Unigraphics NX V2.0 ® se pudo obtener una vista, en tercera dimensión, del aspecto que tendrían las placas que contienen los campos de flujo, esto con la finalidad de tener una mejor perspectiva acerca de las dimensiones reales de las placas colectoras de corriente y a su vez ofrecer la posibilidad de realizar modificaciones en las dimensiones de los campos de flujo, además de quedar a disposición para posteriores aplicaciones. Fig. 2.9

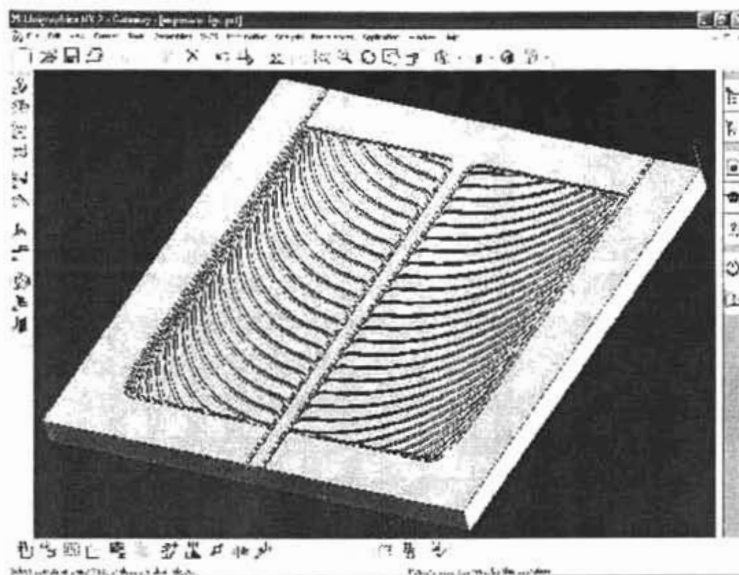


Fig.2.9 Campo de Flujo Biomimético modelado en Unigraphics NX V2.0 ®.

Con base en el empleo de las herramientas antes descritas se obtuvieron las dimensiones mostradas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Datos obtenidos usando software de modelado.

Campo de flujo	Longitud de trayectoria [mm]	Área cubierta [mm ²]	Área base equivalente [mm ²]	Porcentaje de área cubierta [%]
Comercial	2870.2	2296.16	4900	46.86
Triangular	2876.27	2301.016	4900	46.96
Circular	2162.66	1730.128	3848.451	44.96
Biomimético	2679.7924	2143.834	4900	43.75

En donde la longitud de trayectoria fue medida desde el punto de entrada del fluido hasta el de salida, el área cubierta fue calculada tomando como datos la longitud de trayectoria y el ancho del canal (que viene dado por el diámetro del cortador). Por otro lado, el área base equivalente se refiere al área que se tendría cubierta si en lugar de utilizar cualquier tipo de configuración de canales se empleara una caja cuadrada (para el caso comercial y triangular) figura 2.10, con el valor de área útil mostrado en la tabla 2.1, para la configuración circular, se obtuvo un valor de área base equivalente considerando una caja circular cuyo radio (R) equivale a la mitad de la magnitud del lado (a) de la caja cuadrada, como se puede observar en la figura 2.11.

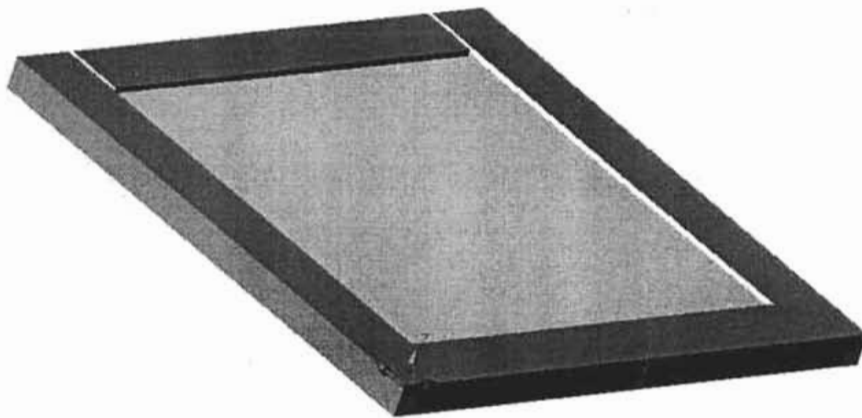
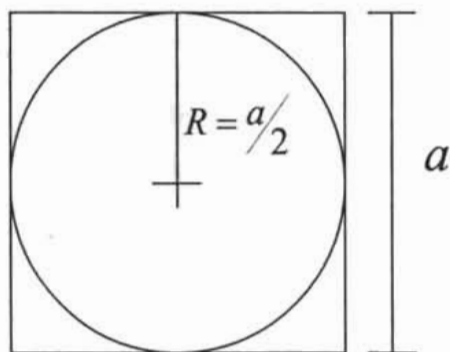


Fig. 2.10 Placa modelada en Mechanical Desktop 6 ®



$$\begin{aligned}
 A &= \pi \times R^2 \\
 &= \pi \left(\frac{a}{2} \right)^2 \\
 &= \pi \left(\frac{70}{2} \right)^2 = \underline{\underline{3848.451 \text{ [mm}^2\text{]}}}
 \end{aligned}$$

Fig. 2.11 Área equivalente campo circular.

Los datos geométricos recabados serán de utilidad para la caracterización de los campos (capítulo. 3), así como también para trabajos posteriores.

2.2 Proceso de manufactura.

La manufactura de los campos de flujo se efectuó mediante el proceso de manufactura asistida por computadora (CAM), para ello se hizo uso del software denominado MasterCAM ® versión 9.0 dado que permitió la rápida programación CNC debido a su interacción con programas CAD utilizados en el diseño de cada uno de los campos considerados en la realización de esta investigación, así como también facilitó la visualización del producto final a través de una simulación característica propia del programa como se muestra en la figura 2.12.

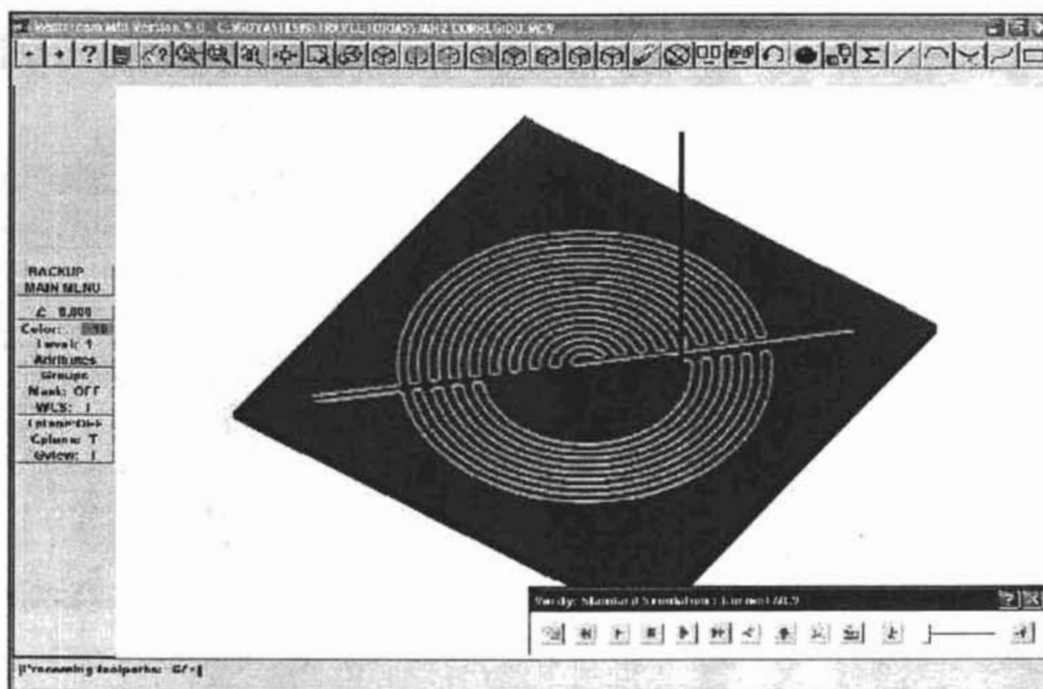


Fig. 2.12 Simulación del maquinado.

Dentro del programa se introducen los parámetros de la herramienta a utilizar durante el proceso, además de las características de corte (avance, RPM's, profundidad de corte).

El maquinado se realiza siguiendo la trayectoria dibujada con sistema CAD, mediante la selección de inicio y final de cada segmento de la misma (caso especial tipo biomimético).

El paso siguiente es configurar la simulación con el objetivo de corroborar el correcto proceso de corte. En caso de obtener un resultado satisfactorio, se procede a la obtención del código numérico de acuerdo a la maquinaria disponible (EMCOTRONIC VMC100®).

La herramienta manejada fue un cortador tipo punta de bola de 0.8 [mm] de diámetro, mayormente utilizado en las herramientas manuales marca DREMEL®, el cual sirve para el corte de madera y polímeros "suaves". El material de las placas sobre las cuales se trabajaron los campos de flujo fue acrílico debido a su relativo bajo costo y transparencia, ya que facilitó la visualización del flujo. Las dimensiones de las placas se vieron restringidas por la capacidad de la máquina a un área cuadrada de 100x100 [mm].

En las figuras 2.13, 2.14, 2.15, se puede observar el maquinado de las placas de acrílico.

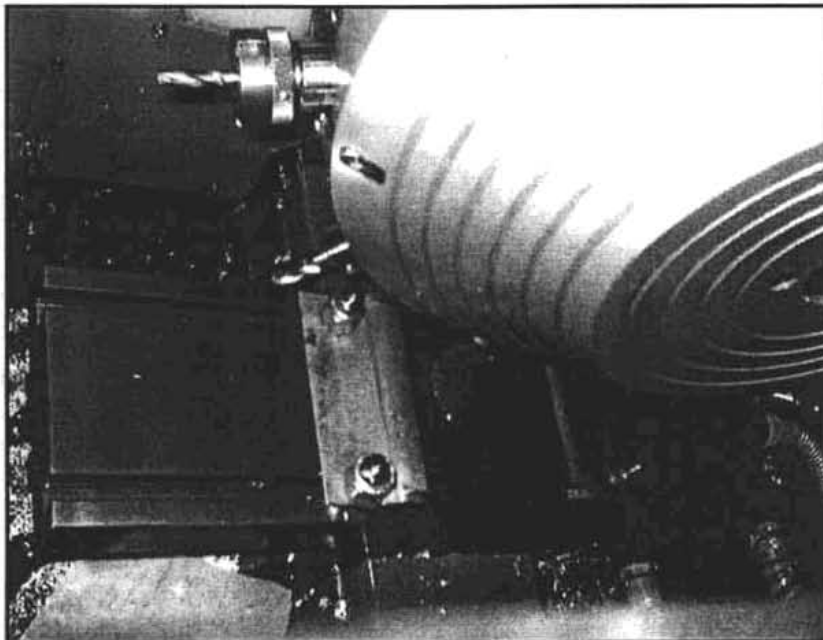


Fig. 2.13. Maquinado de las placas.

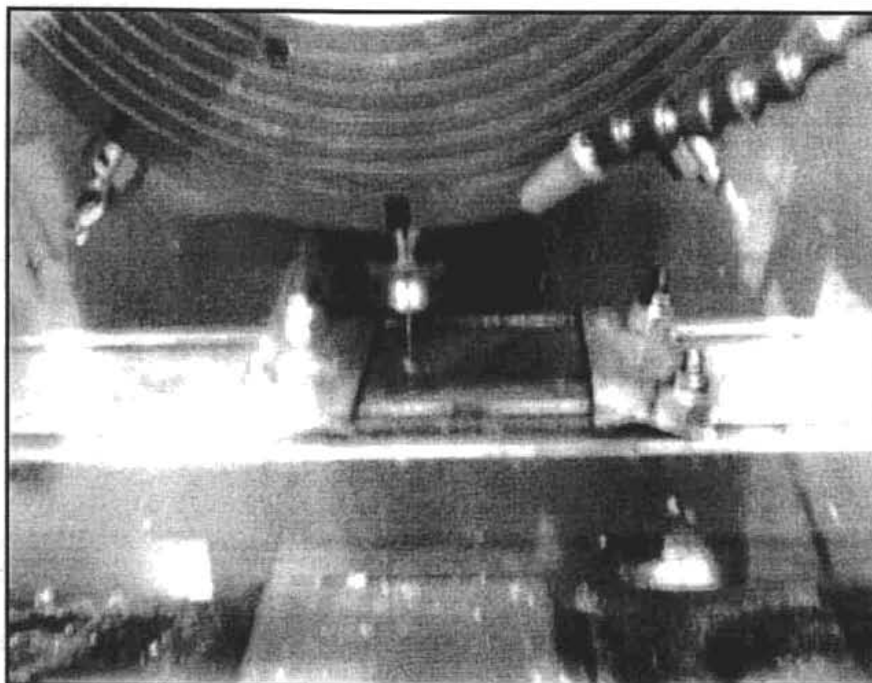


Fig. 2.14 Maquinado de las placas.

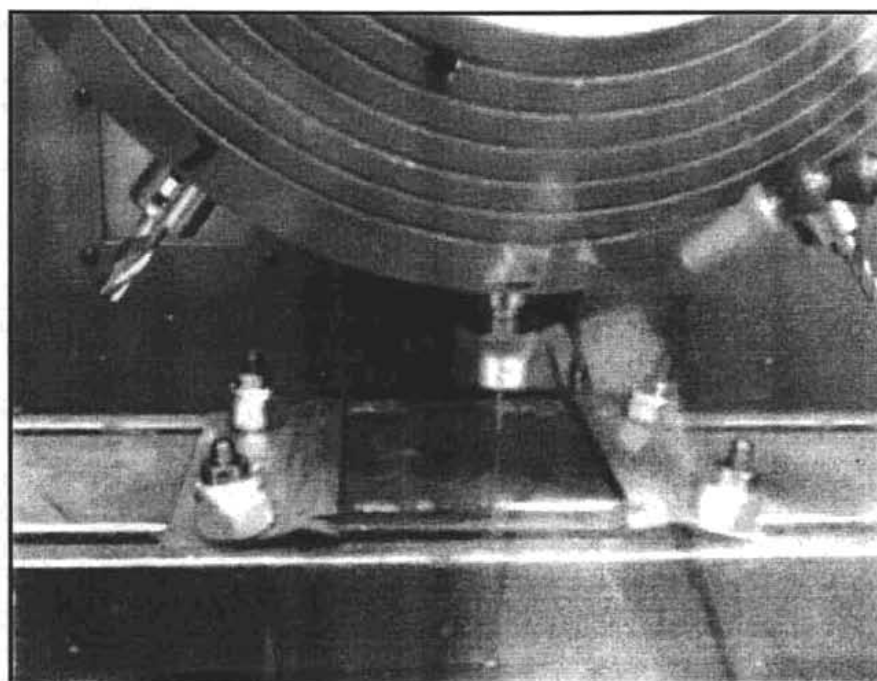


Fig. 2.15 Maquinado de las placas.

En un primer intento de maquinado se obtuvieron las placas mostradas en las figuras 2.16, 2.17 con la finalidad de observar el comportamiento del flujo a través de los canales, sin embargo, dichas placas fueron modificadas ya que se esperaba utilizar un cortador de mayores dimensiones (diám = 2.4 [mm]) con lo cual se obtuvieron como resultado campos de flujo con canales muy separados figuras 2.16, 2.17, lo que a su vez repercute en una menor área activa y por consiguiente se presentaría un mucho menor desempeño de la celda de combustible.

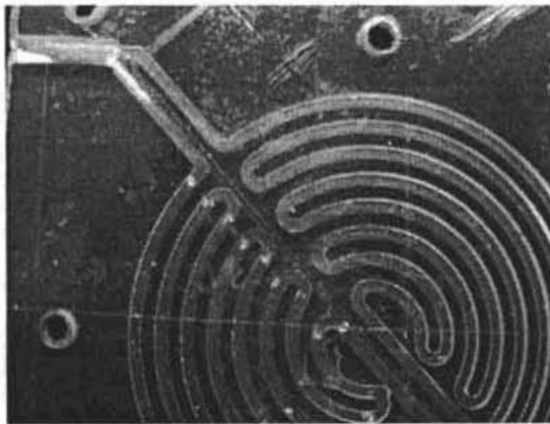


Fig. 2.16 Campo circular.

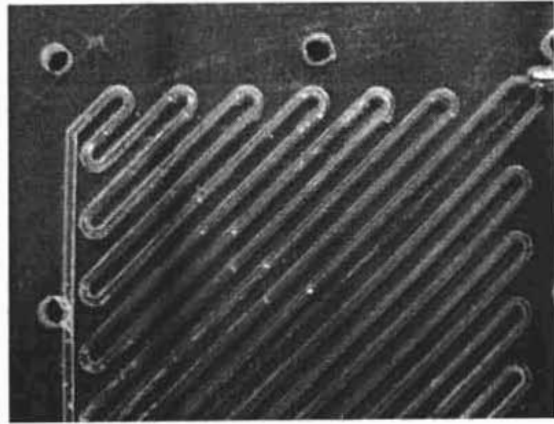


Fig. 2.17 Campo triangular.

Para mejorar el porcentaje de área cubierta se manufacturaron nuevamente los campos de flujo, ahora con la reducción del espesor de pared, con lo que se corrigió el problema descrito arriba y obteniendo como producto los campos de flujo mostrados en las figuras 2.18 y 2.19.

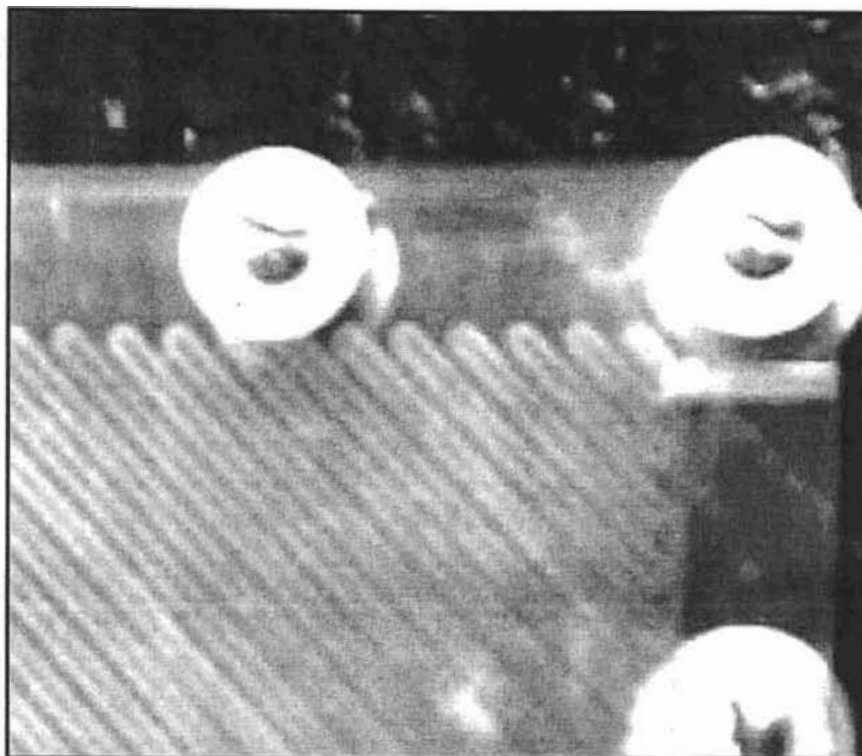


Fig. 2.18. Campo de flujo triangular corregido.

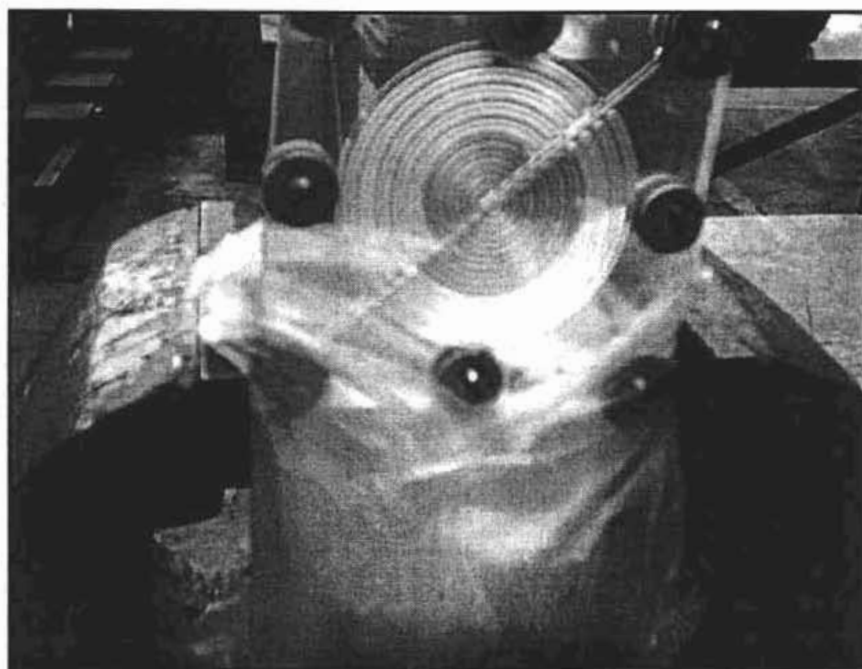


Fig. 2.19 Campo de flujo circular corregido.

Capítulo 3

Caracterización de los Campos de Flujo.

En este capítulo se desarrollarán y describirán los experimentos que se realizaron para la caracterización de los campos de flujo, así como también la explicación del porque se decidió medir estos parámetros y del uso de los materiales y el fluido de trabajo empleados.

3.1 Material de los campos de flujo

El uso de acrílico como material para la fabricación de los campos de flujo, fue debido a que gran parte de la investigación se enfoca en desarrollar un campo de flujo que permita una mejor distribución de los gases dentro de la celda de combustible, así que fue necesario que el material con el que se maquinaran los campos de flujo, permitiera la visualización a través de ellos y, de esta manera, comprobar el desempeño de los mismos y decidir si se obtuvo el resultado esperado.

Otra característica importante del acrílico es su transparencia, por lo que, resultó ser la mejor alternativa para el desarrollo de esta investigación. Además permite ser maquinado de manera rápida, con lo que se podía tener una gran versatilidad en la creación de posibles campos de flujo.

En la figura 3.1, se muestra al campo de flujo biomimético donde se observan los canales maquinados sobre acrílico.

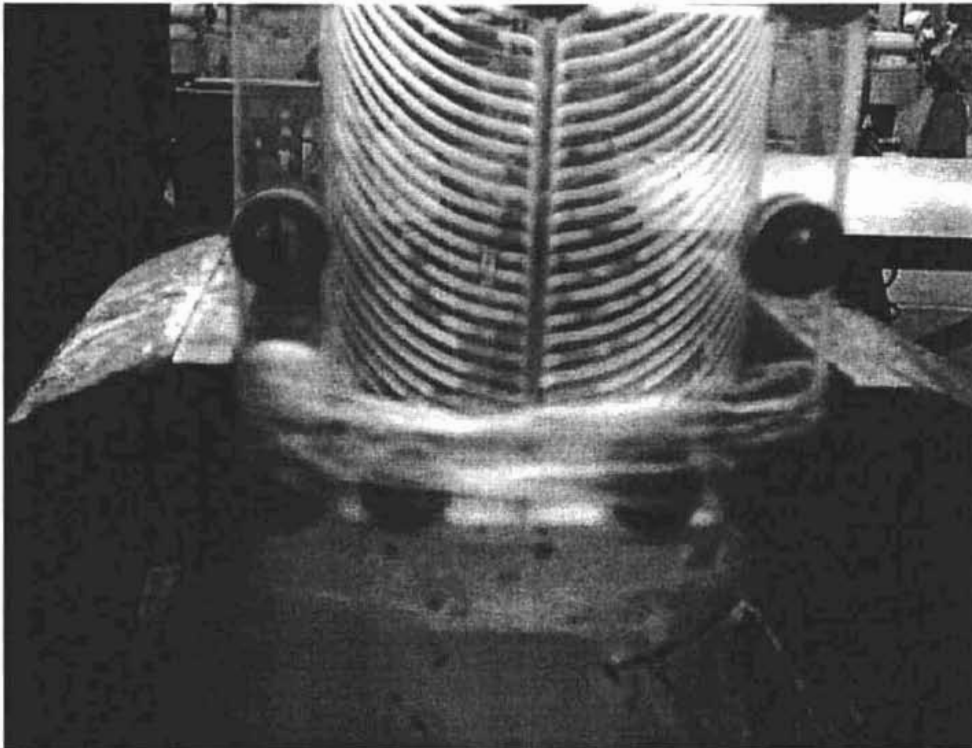


Fig. 3.1 Campo de flujo biomimético maquinado en acrílico.

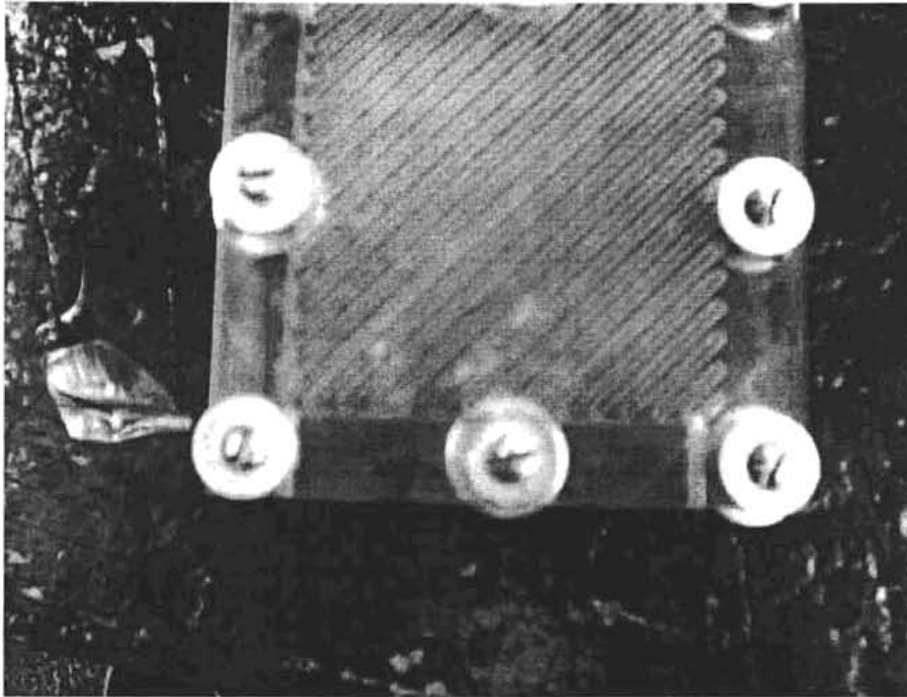


Fig. 3.2 Campo de flujo triangular maquinado en acrílico.

La figura 3.2, muestra el campo de flujo triangular, el cual fue necesario corregir y la manera en que se modificó una vez que se observó una alteración en los canales maquinados.

3.2 Utilización de aire como fluido de trabajo.

Debido a que muchas reacciones, como la oxidación, se desarrollan con lentitud, es que la cinética química (encargada del estudio de las reacciones químicas), considera tres parámetros que deben estar presentes para que una reacción ocurra (que se efectúan a nivel molecular), los cuales son:

- Las moléculas deben colisionar.
- Deben de estar situadas de modo que los grupos que van a reaccionar se encuentren en un estado de transición entre los reactivos y los productos.
- La colisión debe de tener la energía suficiente (energía de activación), para que se obtenga el estado de transición y con esto se obtengan los productos.

Para el caso de reacciones rápidas estos parámetros se cumplen, pero dentro de las celdas no es el caso, debido a que los gases hidrógeno y oxígeno pueden estar juntos en la naturaleza, esto se debe a que el oxígeno no cuenta con la energía necesaria para que produzca la catálisis y con esto la generación de electricidad que se desea obtener con la celda de combustible.

3.3 Caracterización de la Rugosidad.

El parámetro de rugosidad que se presenta al interior de los canales de flujo, se consideró importante, ya que una vez medido junto con el diámetro hidráulico, se podrá obtener la rugosidad relativa para los canales e ingresar al diagrama de Moody.

Este parámetro se cuantificó mediante el uso de un rugosímetro calibrado, y a través de la medición de diferentes puntos de las trayectorias maquinadas, esto con el fin de tener un mejor perfil de la rugosidad existente.

El rugosímetro se colocó como lo muestra la figura 3.3.

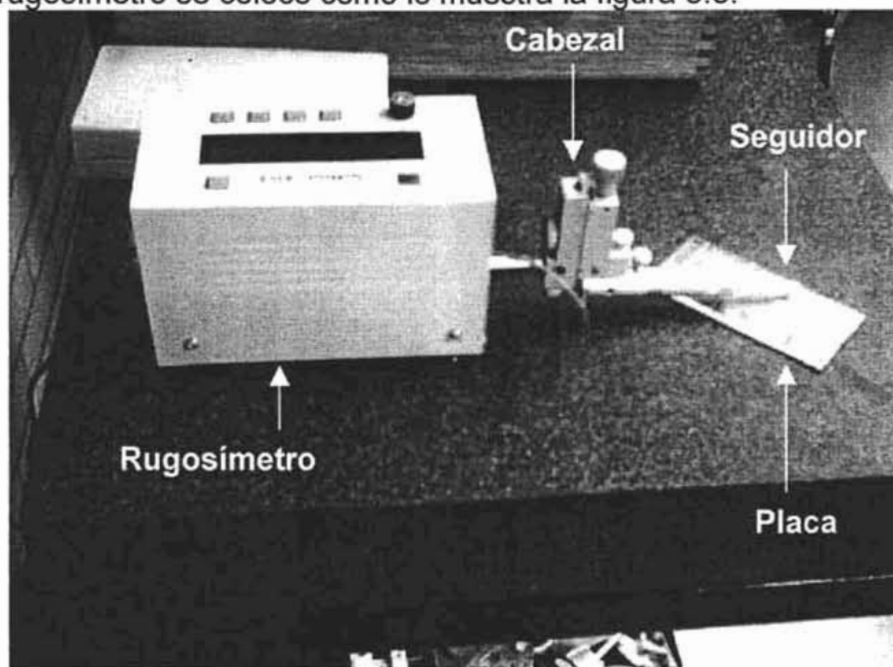


Fig. 3.3 El rugosímetro cuenta con una punta de diamante que al desplazarse a lo largo de un segmento del canal, obtiene la medición correspondiente.

Con los valores obtenidos del muestreo, el resultado es una rugosidad promedio, cuyo valor es el siguiente,

$$\varepsilon = 2.4 [\mu\text{m}]$$

3.4 Cálculo de la sección transversal de flujo.

Como se comentó en un principio, el análisis se efectúa mediante la analogía del cálculo de pérdida de carga en tuberías, donde, según indica la teoría, si el conducto no tiene una sección circular, como es nuestro caso, los principios también son aplicables mediante la utilización del diámetro hidráulico, cuya definición esta dada por:

$$D_H \equiv \frac{4A}{P} \dots\dots\dots (1)$$

Aunque debe tomarse en cuenta que la aproximación del diámetro hidráulico es demasiado burda para flujos laminares en conductos no circulares, se mostrará la validez de su aplicación una vez realizada la experimentación correspondiente, esto se comprobara una vez que se obtenga el régimen de trabajo en el cual se obtendrán los resultados de la experimentación.

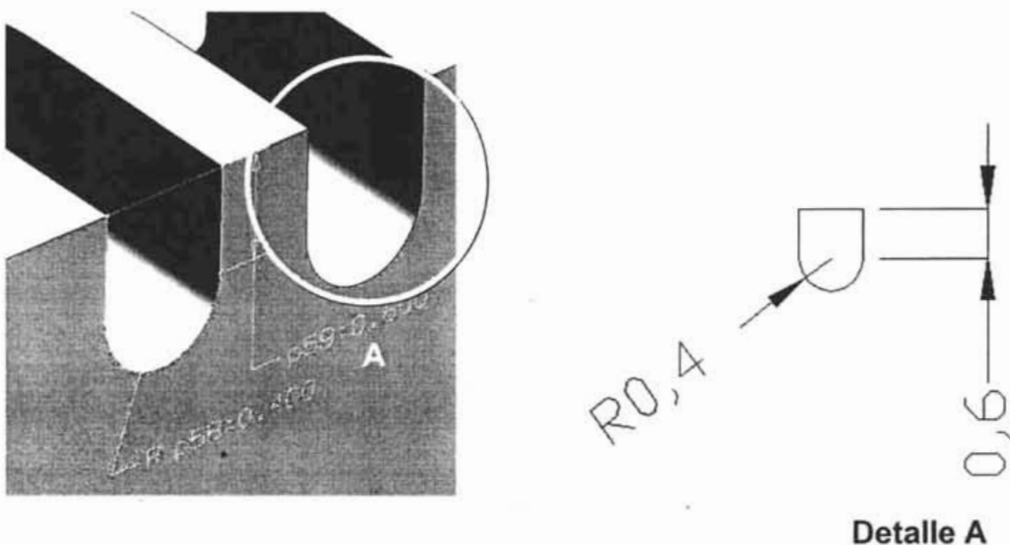


Fig. 3.4 Sección Transversal del Canal en mm.

Para esta sección se calculó el perímetro y el área de la misma, los resultados se reportan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Parámetros geométricos de la sección transversal de los canales

Perímetro[m]	Área [m ²]	Diámetro Hidráulico [m]
3.257 E-3	0.7313 E-6	0.898 E-3

Con los datos obtenidos se procedió al cálculo del valor de rugosidad relativa con el que se ingresó al diagrama de Moody, arrojando como resultado lo siguiente:

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{\varepsilon}{D_H} = \frac{2.4E-6}{0.898E-3} = 0.003 \dots\dots\dots (2)$$

3.5 Longitud de Trayectoria Recorrida.

Recordando que un objetivo de esta investigación es diseñar un campo de flujo que permita tener una mejor distribución de los gases reactivos, y que también exista una mayor estancia de los mismos dentro de la celda, es que se debe tener una trayectoria lo suficientemente larga para que permita que la reacción se realice lo mejor posible, así que mediante el manejo de programas de CAD (en este caso AutoCAD®) se obtuvo la longitud de la trayectoria recorrida por el fluido.

Esto también surge a raíz de que las dimensiones de los canales y sus trayectorias, en algunos casos, son complejas. El empleo del programa anteriormente mencionado facilitó en gran medida la caracterización de este parámetro.

Los valores obtenidos para cada uno de los modelos puestos a análisis son:

Tabla 3.2 Características geométricas de las trayectorias analizadas.

Campo de flujo	Longitud de trayectoria [mm]	Área cubierta [mm ²]	Área base equivalente [mm ²]	Porcentaje de área cubierta [%]
Comercial	2870.2	2296.16	4900	46.86
Triangular	2876.27	2301.016	4900	46.96
Circular	2162.66	1730.128	3848.451	44.96
Biomimético	2679.7924	2143.834	4900	43.75

Cabe hacer notar que el espacio existente entre canales, fue de 1 [mm] para con esto maximizar el área cubierta, lo cual a su vez sirve para tener suficiente resistencia mecánica en las paredes evitando con ello su fractura.

3.6 Visualización de Flujo.

En el apartado 3.1 se justificó el uso de acrílico como material para el maquinado de los campos de flujo, por lo que ahora se tratará la visualización de la distribución de los gases (para la ello se utilizó agua con colorante), y así poder tener puntos de comparación para las conclusiones sobre el trabajo desarrollado.

Se utilizó agua como fluido de visualización, debido a las dimensiones tan pequeñas de los canales. Como se comentó en párrafos anteriores, al utilizarse algún tipo de humo (vapor de glicerina o humo de tabaco), este presentó una tendencia a condensarse en las paredes de los canales lo cual no permitió la visualización de distribución alguna dentro de los mismos.

Esto complicó el desarrollo del trabajo debido a que una vez condensado el humo o el vapor, era de difícil remoción, lo que obligaba desmontar cada uno de los campos donde se pretendía efectuar dicha visualización.

El agua con colorante, a diferencia de los anteriores, si mostraba su distribución a lo largo de los canales de manera clara, como se muestra en las figuras 3.5 y 3.6.

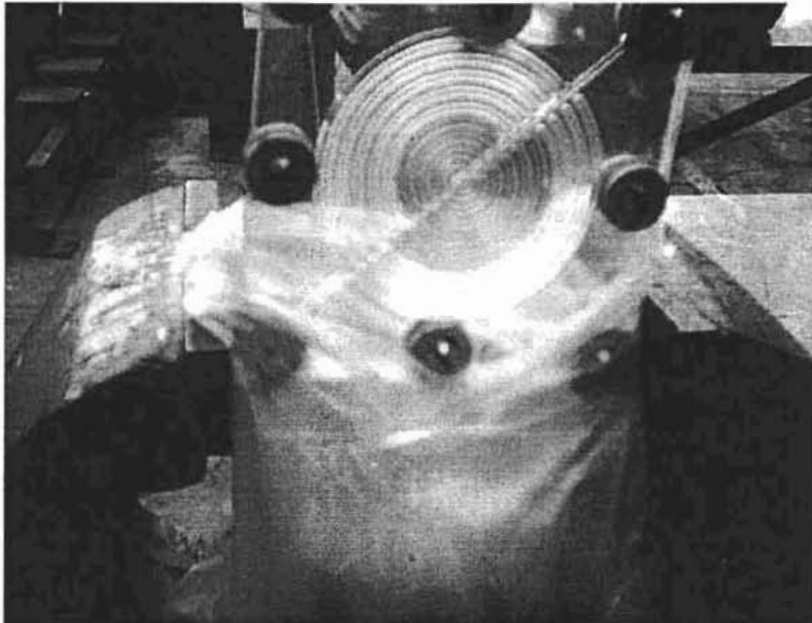


Fig.3.5 Visualización del campo de flujo circular

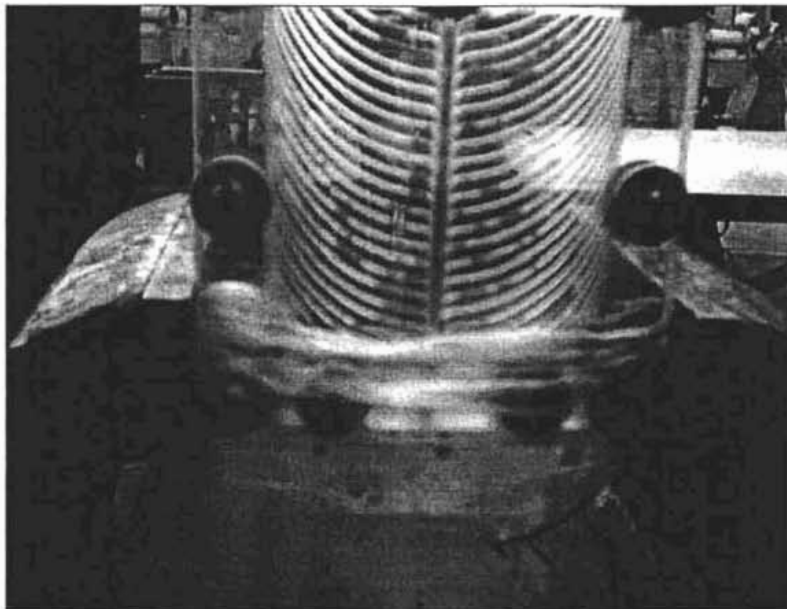


Fig.3.6 Visualización del campo de flujo biomimético

Para la implementación de experimento de la visualización, como se muestra en la figura 3.7, se utilizó una bomba centrífuga para inyectar el fluido, lo que sirvió a su vez para localizar las fugas existentes dentro de los canales para corregirlas de manera previa a los experimentos que utilizaron aire a diferentes presiones de entrada.

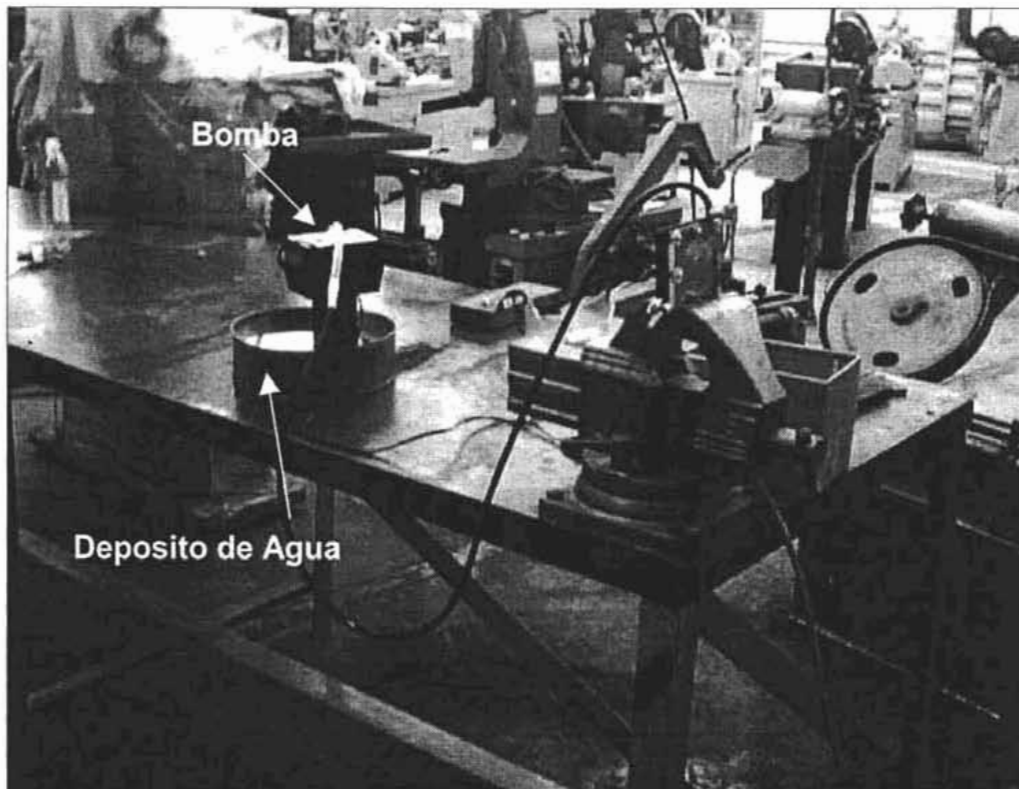


Fig. 3.7 Implementación del experimento.

3.7 Implementación del Experimento

Para la experimentación correspondiente, se utilizó un anemómetro de hilo caliente HWA (Hot Wire Anemometry por sus siglas en inglés), el cual basa su funcionamiento en el enfriamiento de un hilo o alambre mediante el flujo de aire (como es nuestro caso) cuya velocidad se requiere medir, ya que en principio la transferencia de calor por convección del hilo se refleja en un cambio en su

temperatura que está directamente relacionada con su velocidad así como también con otros factores presentes en el fluido.

El HWA utilizado durante la experimentación es del tipo de temperatura constante, donde su funcionamiento consiste en conservar la temperatura del hilo constante. A medida que la velocidad aumenta, la temperatura disminuirá, así que, para mantener constante dicha temperatura la corriente eléctrica que circula a través del hilo se incrementará con el fin de mantener constante la temperatura del mismo.

La sonda utilizada para la experimentación tiene como una de sus principales características la de ofrecer una buena respuesta a los cambios en la frecuencia.

Durante la calibración se fijó un rango de temperaturas, de entre 0 y 60 [m/s], este instrumento de medición, tiene como ventajas en su funcionamiento, que su calibración se realiza de manera automática para los valores deseados.

Esta calibración se realizó empleando el rango de velocidades mencionado con el fin de contar con una mayor libertad en la variación de las velocidades existentes dentro de los campos de flujo, aunque durante el desarrollo de los experimentos y con respecto a los resultados de la misma, se decidirá si estuvo excedida o acotada una vez que se tengan los resultados de las mediciones correspondientes y se comenten dentro de las conclusiones del trabajo realizado.

La calibración del HWA se llevó a cabo una vez que se tuvo presente la dificultad de obtener una solución analítica para el problema de transferencia de calor existente. El sistema de calibración de hilo caliente cuenta con diferentes toberas que se ajustan a un valor fijo de velocidad del flujo y mediante la medición del voltaje que se requirió para mantener la temperatura constante se consigue la calibración deseada.

Una vez calibrado el hilo, fue necesario el uso de un instrumento que permitiera la variación del flujo de aire que circulaba a través de los campos de flujo sometidos a la experimentación, donde una vez que son conocidas las áreas transversales de los canales y el dato de velocidad obtenido del HWA se puede

obtener el gasto de aire que se utiliza en el campo de flujo y que presenta para las diferentes pérdidas de carga.

La implementación del experimento fue la siguiente, figura 3.8 :

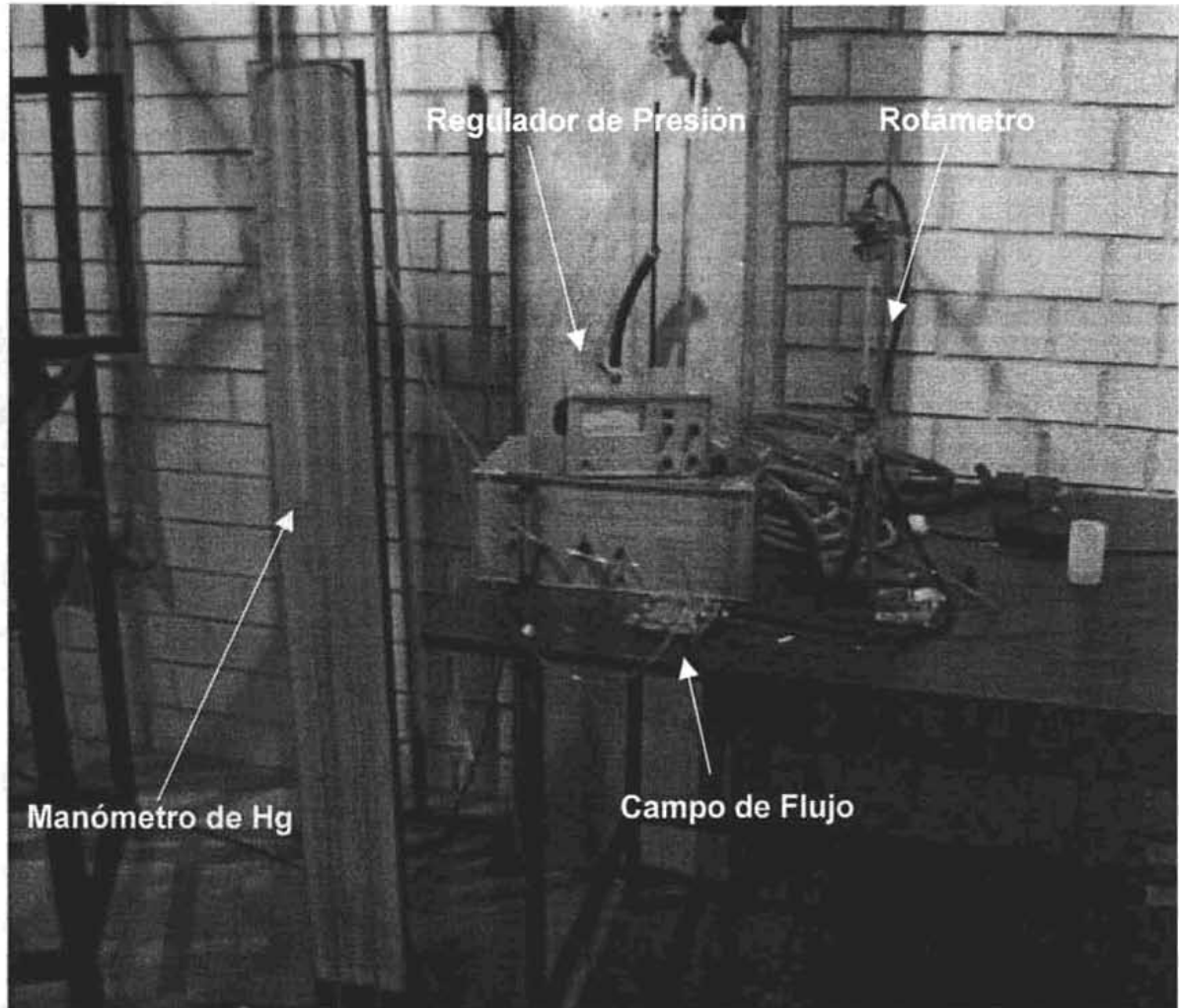


Fig. 3.8 Caracterización de Caídas de Presión.

El rotámetro, mas que un medidor de gasto como esta diseñado, nos permitió observar y controlar los incrementos de velocidad a los que se sometían los campos de flujo. Este fue empleado de esta manera como consecuencia de que no se contó con la escala de las unidades con las que proporciona la medición del gasto que se estaba utilizando.

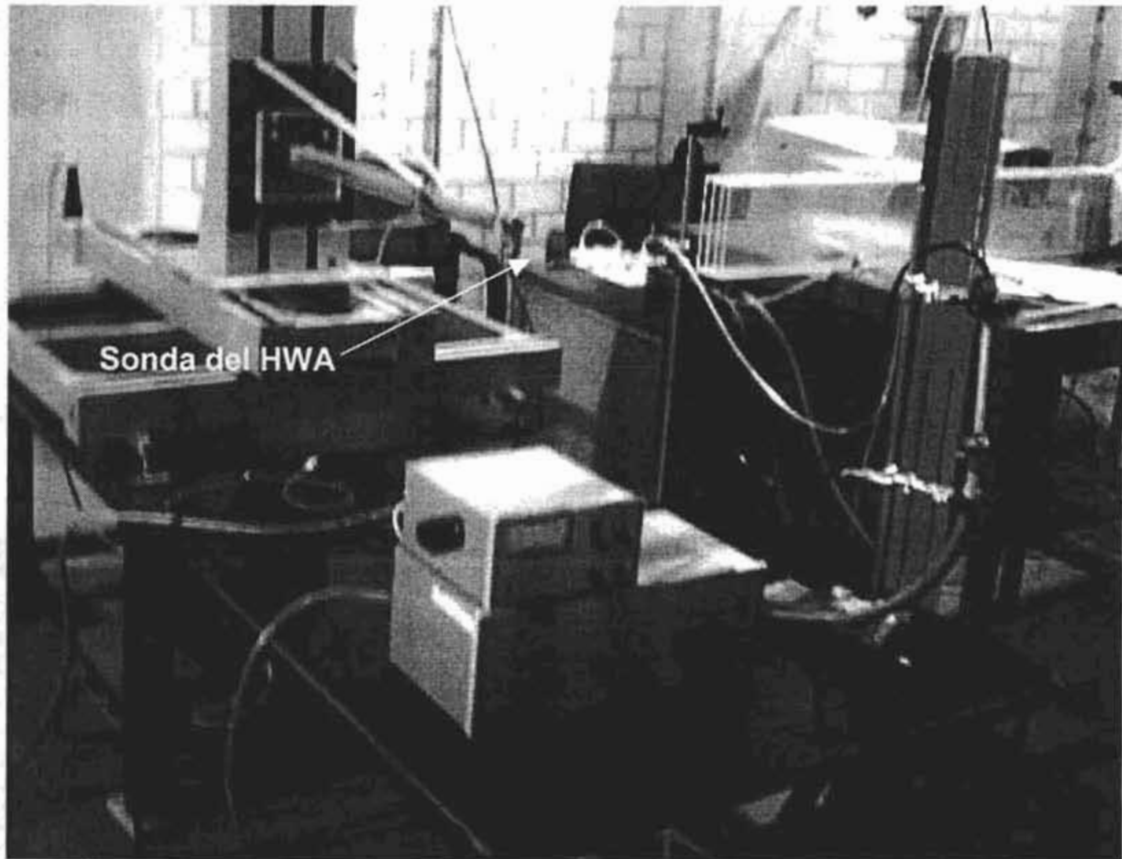


Fig. 3.9 Medición de Velocidades.

Los campos de flujo con los que se experimentó se denominaron como comercial, circular y triangular, esto se debió a que solo estos campos de flujo presentaban una trayectoria definida, caso contrario al campo biomimético que no presento una distribución homogénea a través del campo, razón por la cual se decidió no caracterizar la pérdida de presión existente dentro del mismo.

De la experimentación, uno de los parámetros a medir es el referente a la pérdida de presión dentro del campo, la cual se obtuvo mediante el manómetro diferencial de mercurio que permitió cuantificar tal característica de una mejor manera. Sin embargo, las caídas de presión que se presentaron fueron tan grandes que los manómetros de agua utilizados, no permitieron su caracterización, ya que su rango de medición fue menor.

La figura 3.10 muestra la implementación de la toma de presión.

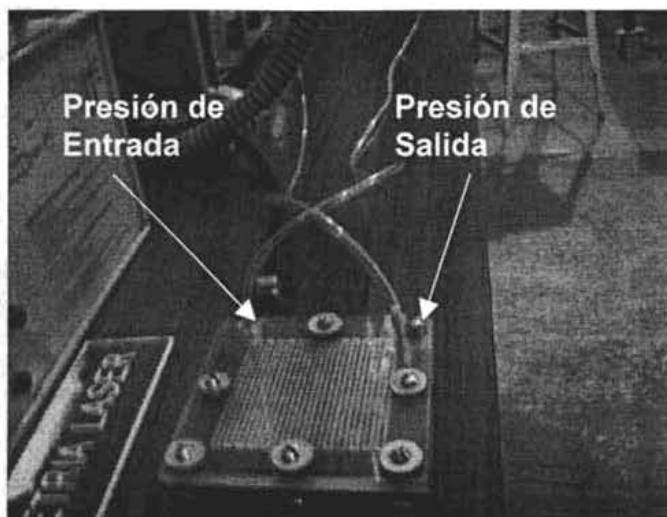


Fig. 3.10 Campo comercial sometido a experimentación

Los resultados recabados correspondientes a los campos caracterizados se muestran a continuación:

Campo Comercial

Los resultados referentes a la caída de presión y velocidad en el canal obtenidos de la experimentación son:

Tabla 3.3 Caída de Presión - Velocidad

Lectura [mmHg]	V cond [m/s]
34	3,48
79	6,08
167	12,45
343	16,80
569	22,01
734	27,22
935	30,99
1035	36,20

Calculando el Reynolds existente para este campo, tenemos que el Re esta definido como:

$$Re = \frac{U_c * D_h}{\nu}$$

Donde:

U_c es la velocidad del fluido dentro del canal

D_h es el diámetro hidráulico y

ν es la viscosidad cinemática del fluido

$$\nu = 1.9657 E - 5 \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Y que el diámetro hidráulico dentro de los campos de flujo es:

$$D_h = 0,898 \text{ [mm]}$$

Además, recordando que la caída de presión esta dada por :

$$P = \rho g h$$

$$\Delta P = P_e - P_s$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido manométrico

g es la aceleración gravitacional

h es la altura indicada en el manómetro

P_e es la presión de entrada

P_s es la presión de salida

Finalmente se obtiene la tabla 3.4 correspondiente a la caída de presión dentro del campo comparada con el número de Re existente dentro del mismo:

Tabla 3.4 ΔP - Re

ΔP [Pa]	Re
4522	159
10508	278
22212	569
45622	767
75682	1005
97628	1244
124362	1416
137663	1654

En figura 3.11 se graficaron los datos mostrados en la tabla 3.4, correspondientes al campo comercial.

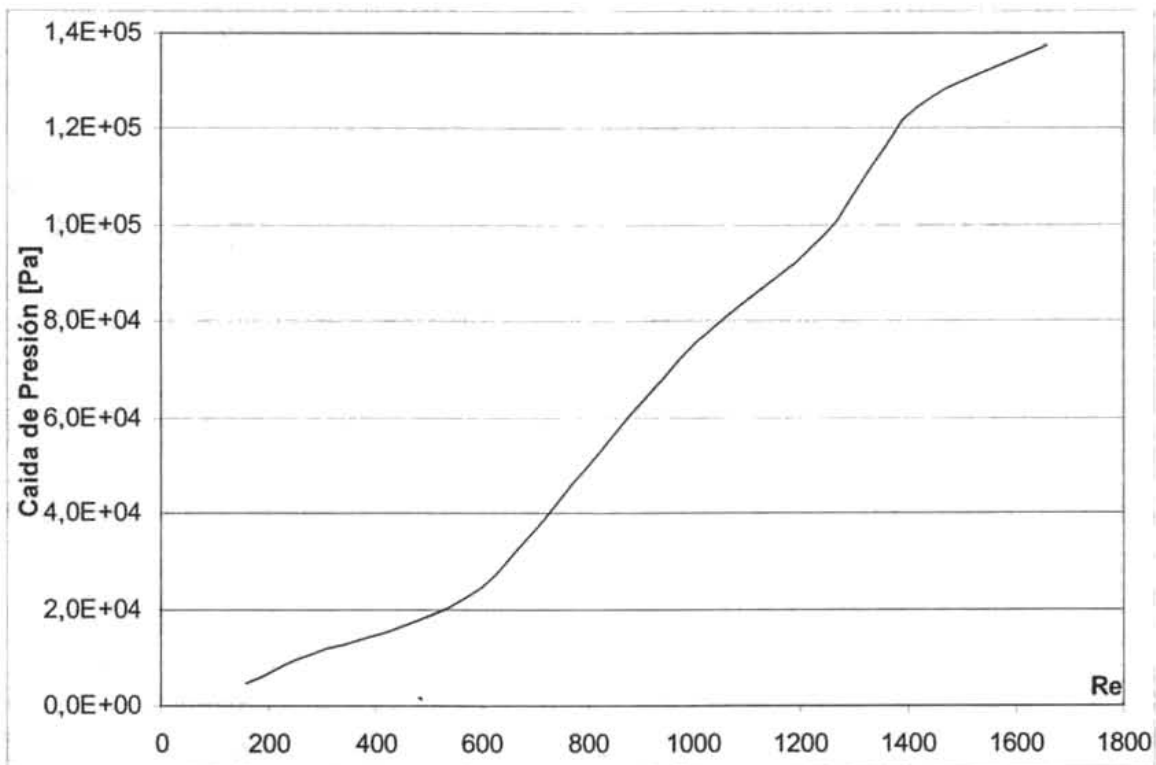


Fig. 3.11 Gráfica Re vs ΔP , Campo Comercial.

Para el cálculo del factor de fricción dentro de los campos de flujo, se consideraron dos situaciones diferentes, en la primera tomó al fluido como incompresible mediante el uso de la ecuación de Darcy.

Donde:

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{L}{D_h} * \frac{\gamma}{2g} V^2}$$

ΔP es la caída de presión dentro del campo de flujo

D_h es el diámetro hidráulico

L es la longitud de trayectoria del campo de flujo

V es la velocidad del fluido dentro del conducto

g es la aceleración gravitacional

γ es el peso específico del aire

La segunda situación considero al fluido como compresible (realmente lo es), en el apartado de conclusiones se explican las razones del uso de estas consideraciones, la correlación utilizada es la correspondiente a un **Flujo Isotermo con Fricción**, la cual se aplica de mejor manera a canales rectos, caso contrario a los campos de flujo con los que se contaron, y que relaciona de manera explícita al gasto másico como función de la caída de presión, donde el valor calculado es un valor promedio .

La correlación es:

$$\bar{f} = \frac{D_h}{L} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{RT(\rho_s v_s)^2} - 2Ln \frac{P_1}{P_2} \right]$$

Donde:

P_1 y P_2 son las presiones absolutas al inicio y al final del campo de flujo

D_h es el diámetro hidráulico

L es la longitud de trayectoria del campo de flujo

R es la constante universal de los gases

T es la temperatura del fluido

v_s es la velocidad del fluido a la salida del campo de flujo

ρ_s es la densidad del fluido a la salida del campo de flujo

Además de la medición de las caídas de presión, una vez que se consideró el uso de las correlaciones anteriormente mencionadas, también fue necesario la medir las presiones P_1 y P_2 absolutas, donde el correspondiente valor de P_2 absoluta se calculó de la siguiente manera:

$$P_2 = P_{1m} + P_{atm} - \Delta P$$

Donde:

P_2 es la presión absoluta al final del campo de flujo

P_{1m} es la presión manométrica al inicio del campo de flujo

P_{atm} es la presión atmosférica al inicio del campo de flujo

ΔP es la diferencia de presiones o caída de presión en el campo de flujo

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Resultados Obtenidos, Campo Comercial

ΔP	P1 abs [Pa]	P2 abs [Pa]	V HWA	V cond	f (incomp)	f (comp)	Re
7714	84847	77133	1,86	7,20	0,26997	0,28370	329
18222	94823	76601	2,83	10,95	0,27546	0,30616	500
54799	135124	80325	2,95	11,42	0,76236	1,06532	522
81534	173298	91764	4,40	17,03	0,50987	0,87622	778
80736	185002	104267	4,80	18,58	0,42424	0,79565	849
76613	211338	134725	6,20	23,99	0,24129	0,54129	1096

La tabla 3.5 muestra los valores calculados tanto para la correlación de flujo compresible como de flujo incompresible, donde se puede apreciar que no hay un gran cambio en los valores del factor de fricción.

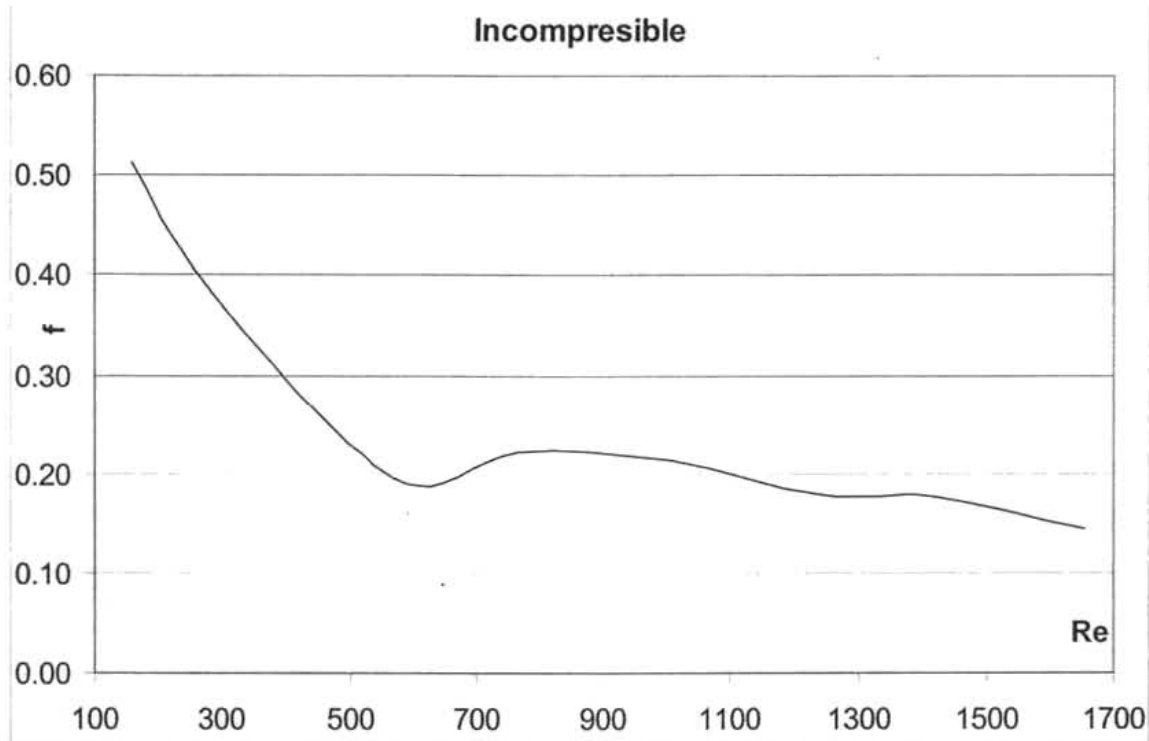


Fig. 3.11 Gráfica Re - f , Campo Comercial.

Las figuras 3.11 y 3.12 muestran el comportamiento del factor de fricción calculado dentro de los canales de los campos de flujo, donde se observa el decrecimiento del mismo a medida que se incrementó la velocidad media del flujo, este comportamiento es similar al reportado por Jiang [12]. Esta tendencia se presentó de manera similar para ambas situaciones (fluido compresible e incompresible) desarrolladas dentro de la investigación, así que se puede considerar que el efecto de la compresibilidad no es muy relevante para los rangos de velocidades manejados y que ambas correlaciones utilizadas, logran estimar el valor calculado de manera muy aproximada.

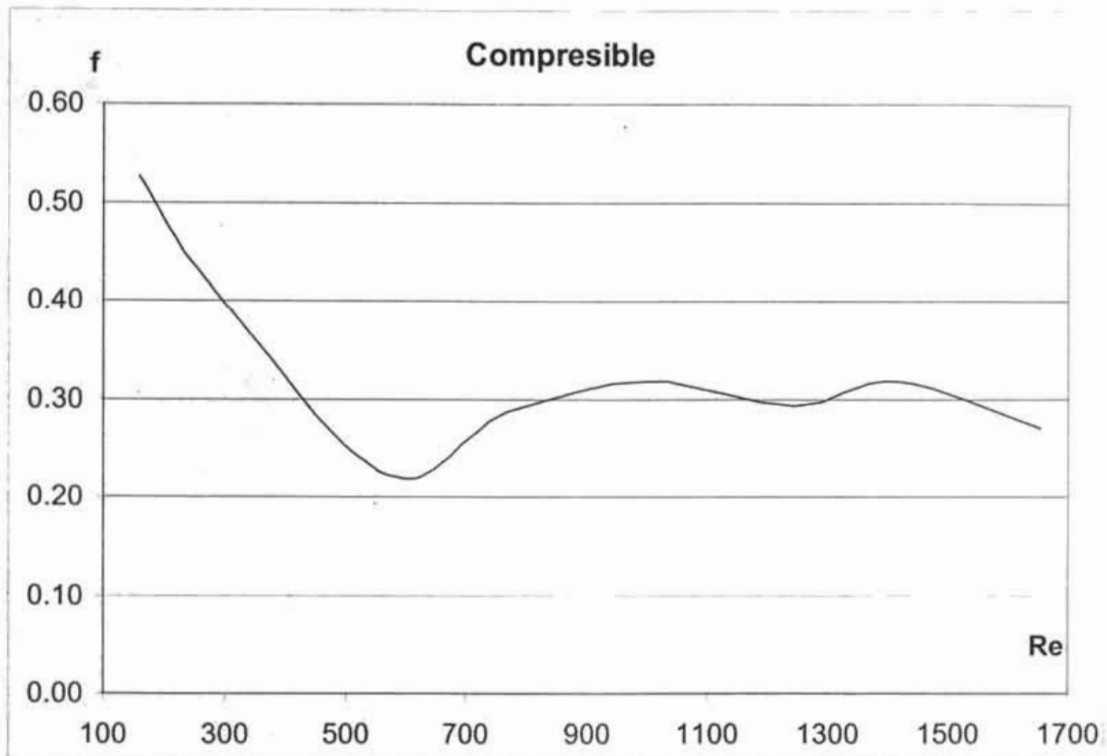


Fig. 3.12 Gráfica Re – f, Campo Comercial.

Campo Triangular

De manera similar al campo comercial, para el campo triangular se obtuvieron los mismos parámetros y se realizaron los cálculos correspondientes, mismos que se resumen en las tablas 3.6 y 3.7.

La tabla 3.6 muestra

Tabla 3.6 $\Delta P - V$

Lectura [mmHg]	V cond[m/s]
57	4,64
129	8,13
311	16,64
491	22,45
703	29,41
875	36,38
1037	41,41

Los resultados obtenidos para la ΔP cuantificada con el Re se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.7 ΔP - Re

ΔP [Pa]	Re
7581	212
17158	371
41365	760
65307	1025
93505	1344
116382	1662
137929	1892

La gráfica correspondiente se muestra en la siguiente figura:

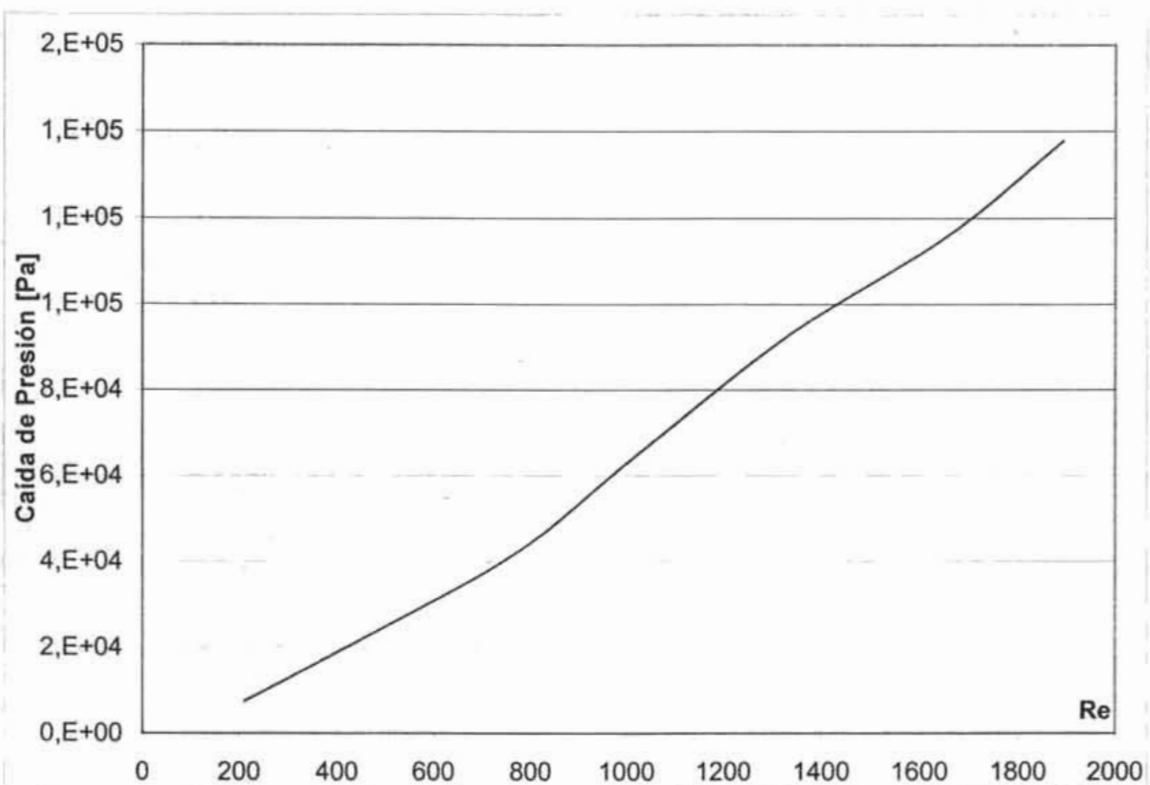


Fig. 3.13 Gráfica Re - ΔP , Campo Triangular

Los valores relativos a los cálculos del factor de fricción se muestran a continuación:

Tabla 3.8 Resultados Obtenidos, Campo Triangular

ΔP	P1 abs[Pa]	P2 abs[Pa]	V HWA	V cond	f (incomp)	f (comp)	Re
7581	84581	77000	1,20	4,64	0,47927	0,50257	212
17158	94158	77000	2,10	8,13	0,35418	0,39324	371
41365	118365	77000	4,30	16,64	0,20365	0,25773	760
65307	142307	77000	5,80	22,45	0,17672	0,25081	1025
93505	171303	77798	7,60	29,41	0,14737	0,23730	1344
116382	194180	77798	9,40	36,38	0,11990	0,21054	1662
137929	216126	78197	10,70	41,41	0,10967	0,20825	1892

La graficas que describen el comportamiento del fenómeno son las siguientes:

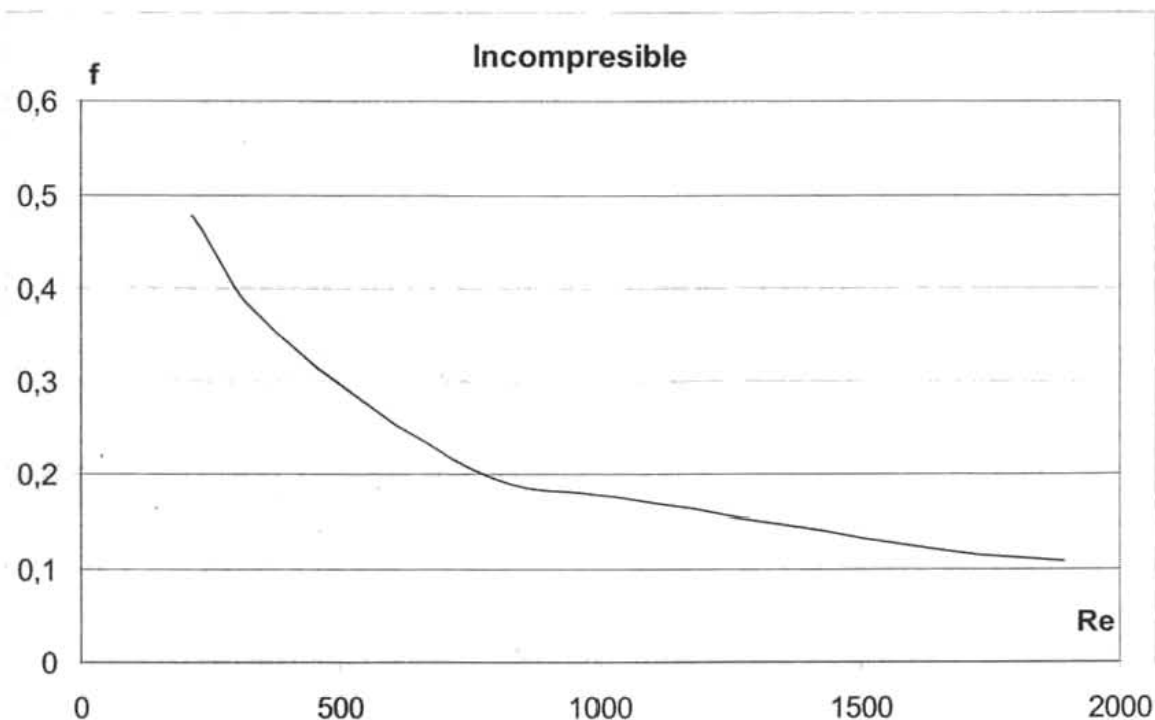


Fig. 3.14 Grafica Re – f, Campo Triangular.

De acuerdo con los resultados observados para el campo triangular, el comportamiento mostrado dentro de la trayectoria en turno, fue similar al exhibido por el campo circular, ya que a medida que se incrementó la velocidad dentro de los canales (y por lo tanto el Re), el factor de fricción decreció, como lo muestran las figuras 3.14 y 3.15, donde nuevamente se tuvo presente una similitud entre los valores entregados por ambas correlaciones

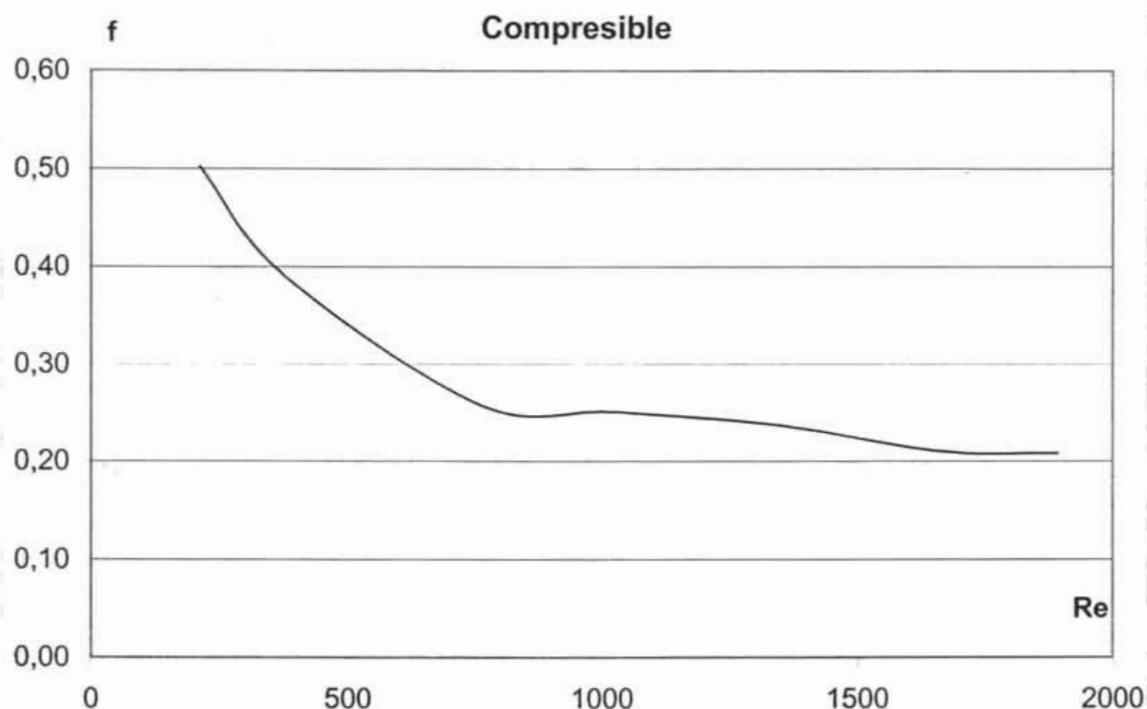


Fig. 3.15 $Re - f$, Campo Triangular.

Campo Circular

De la misma manera, se realizó la experimentación para el campo circular, los resultados para la caída de presión presente a lo largo de éste se muestran en la tabla 3.9:

Tabla 3.9 ΔP - V

Lectura [mmHg]	V cond [m/s]
58	7.20
137	10.95
412	11.42
613	17.03
607	18.58
576	23.99

Los valores calculados de ΔP - Re para este campo se muestran a continuación (tabla 3.10), donde se presenta un incremento considerable por caída de presión a pequeños incrementos en la variación de la velocidad del aire inyectado al interior de los canales:

Tabla 3.10 ΔP - Re

ΔP [Pa]	Re
7714	329
18222	500
54799	522
81534	778
80736	849
76613	1096

La gráfica correspondiente se muestra a continuación:

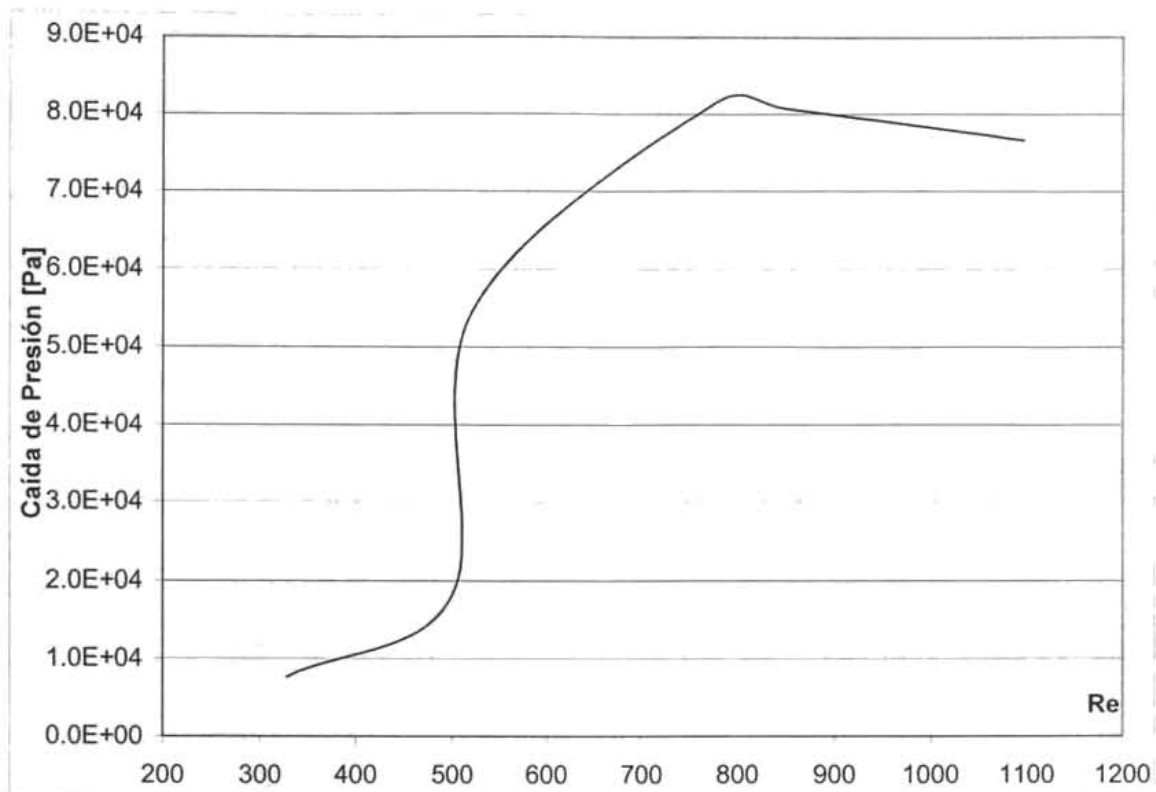


Fig. 3.16 Grafica Re - ΔP , Campo Circular.

La figura 3.16 presenta un comportamiento diferente a las mostradas para los campos comercial y triangular, donde el crecimiento de la caída de presión tuvo lugar de una manera menos brusca, este "salto" se puede atribuir a la forma en que se encontraba colocada la toma de medición del manómetro diferencial, ya que de observaciones posteriores a la medición, la salida del aire inyectado sufrió una expansión y cambio de dirección brusco que alteró las mediciones y de aquí los resultados de la experimentación realizada.

Para los siguientes parámetros medidos, se observa, de manera más clara, este efecto, una vez que la presión 2, que se pensó como atmosférica, mostró valores por encima de esta (77000 [Pa]) como se observa en la tabla correspondiente (3.11), misma que se muestra a continuación:

Tabla 3.11 Resultados Obtenidos, Campo Circular.

ΔP	P1 abs[Pa]	P2 abs[Pa]	V HWA	V cond	f (incomp)	f (comp)	Re
7714	84847	77133	1.9	7.2	0.26997	0.28370	329
18222	94823	76601	2.8	11.0	0.27546	0.30616	500
54799	135124	80325	3.0	11.4	0.76236	1.06532	522
81534	173298	91764	4.4	17.0	0.50987	0.87622	778
80736	185002	104267	4.8	18.6	0.42424	0.79565	849
76613	211338	134725	6.2	24.0	0.24129	0.54129	1096

Esta suposición, de la expansión del aire a la salida se refuerza observando que tanto los valores de la velocidad dentro del conducto, como los de presión son muy diferentes a los medidos a la salida del campo de flujo, estos efectos fueron cuantificados al medir la sección de la salida del aire y del canal para encontrar una relación entre el valor de velocidad a la salida del campo y dentro del conducto mediante el empleo de la ecuación de continuidad para esta zona de medición:

Tenemos a la salida una sección circular, así que presenta una área igual a:

$$D_{sal} = 1.9 \text{ [mm]}$$

$$A_{sal} = 2.83 \text{ [mm}^2\text{]}$$

De la ecuación:

$$Q = V_s A_s = V_c A_c$$

Obtenemos entonces, que la velocidad dentro de los canales esta dada por:

$$V_c = \frac{2.83}{0.7313} V_s = 3.87 V_s$$

Con lo que explicamos los valores medidos de la tabla 3.11 para la velocidad mostrada en la misma.

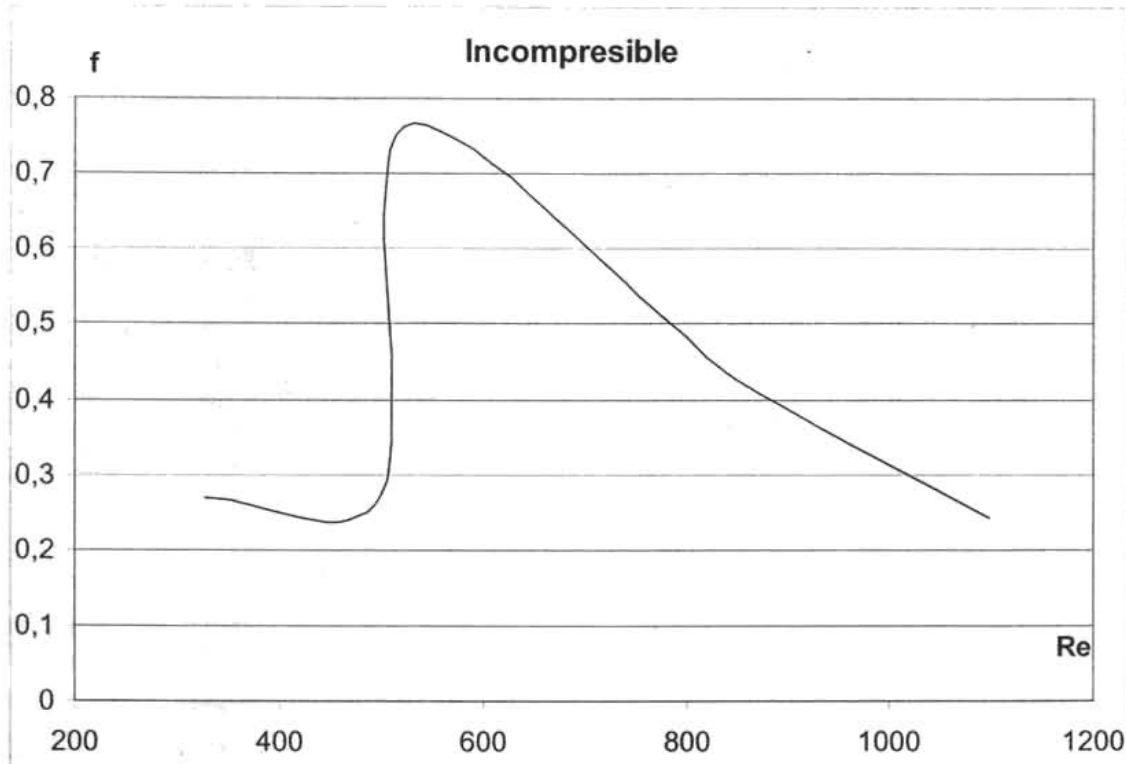


Fig. 3.17 Grafica Re – f , Campo Circular.

La expansión desarrollada, después de medidas las caídas de presión totales dentro del campo, también se ve reflejada dentro de las graficas de factor de fricción que se muestran en las figuras 3.17 y 3.18 que presentan el mismo comportamiento y valores muy similares para los f calculados, mismos que validan la teoría de flujo incompresible puesto que los valores calculados para este flujo fueron muy similares a los de flujo compresible, lo que también sirve para concluir que los efectos de la compresión se reflejan en un incremento en el factor de fricción como se observo en la graficas correspondientes para cada campo analizado.

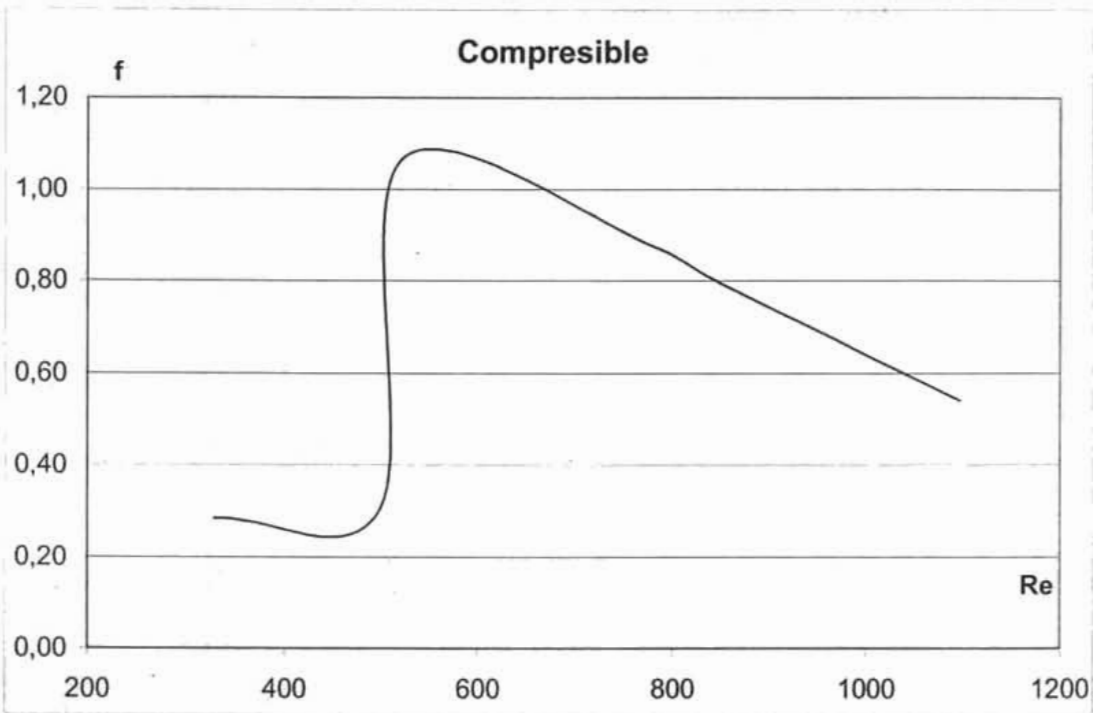
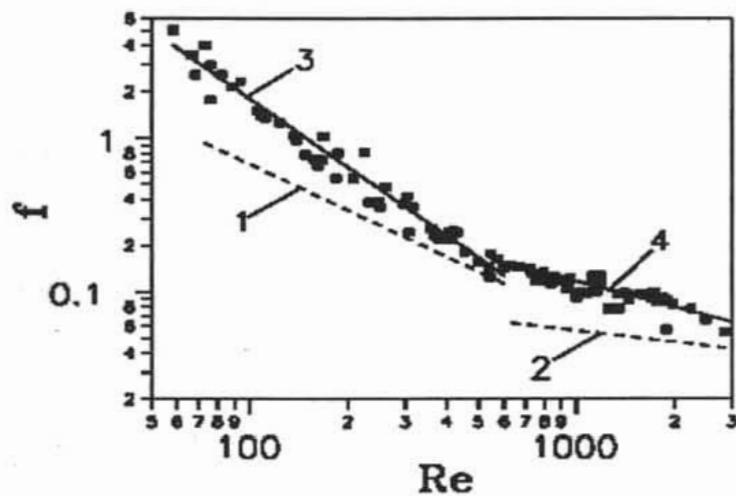


Fig. 3.18 Grafica Re - f , Campo Circular.

Dentro de la literatura consultada, se observa un comportamiento similar a los valores obtenidos durante esta investigación, para los campos comercial y triangular, este comportamiento lo reporta Jiang[12], donde la gráfica que describe el funcionamiento termo-hidráulico en microcanales se muestra en la figura 3.18. donde se reporta el comportamiento para canales rectos con diferentes correlaciones para el régimen de flujo presente en el fenómeno.



3.19 Gráfica reportada Jiang, Re - f, microcanales.

La figura 3.20 muestra una comparación entre los resultados experimentales y los que se obtuvieron al utilizar la correlación reportada por Jiang[], donde se observó un comportamiento similar a lo ya tratado en los párrafos anteriores.

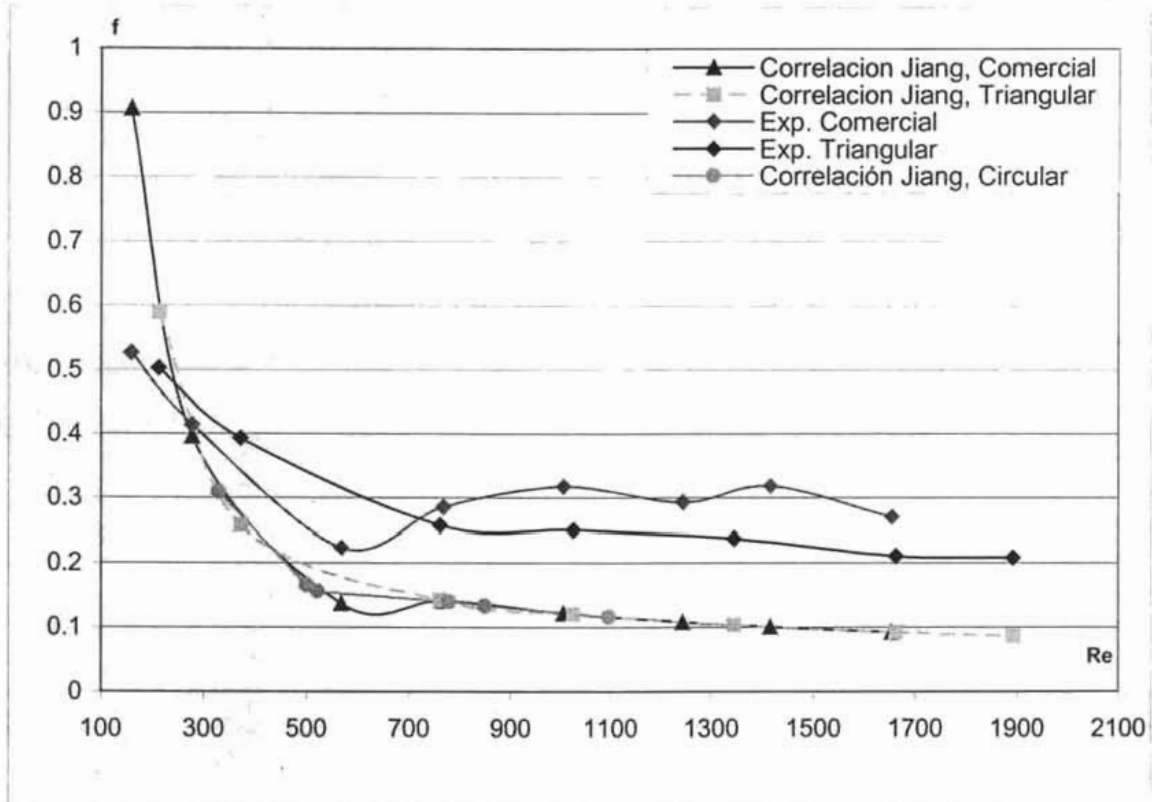


Fig. 3.20 Gráfica comparativa entre los resultados experimentales y los obtenidos a partir de la correlación de Jiang .

Capítulo 4

Análisis de Resultados

Introducción

Dentro de este capítulo se realizara el análisis de los resultados obtenidos de la experimentación realizada, y a partir de estos poder definir si se cumplió el objetivo de la investigación, así como también se concluirá el trabajo.

4.1 Descripción del método utilizado para la selección de los campos.

El método que se utilizó para la selección del mejor campo de flujo analizado durante la investigación ya comentada en el capítulo 3, es el método de Convergencia Controlada o DATUM.

Este método se caracteriza por ser una técnica de ayuda a la creatividad, así como, también de ser un método de selección de alternativas. Al ser un método que combina ambos, lleva incluido un proceso de mejora y refinamiento de las opciones planteadas con lo que al final del proceso, la selección que cumple con los requerimientos deseados podrá no ser íntegramente una de las puestas en análisis en un principio sino una modificación de alguna de ellas.

En otras palabras la ventaja del método (razón por la que se eligió) con respecto a otros métodos de selección, es la posibilidad de generar soluciones durante la aplicación del mismo. Esto se logra una vez que se tienen presentes diferentes puntos de vista, lo que hará que el método converja hasta el mejor diseño.

Una consideración para la aplicación del método es que es imposible evaluar todas las posibles soluciones a un problema dado, por lo que tal procedimiento facilita la formulación y evaluación de las mismas.

4.2 Matriz de Decisión para los campos de flujo.

La matriz de decisión del problema toma en cuenta los parámetros cuantificados durante la experimentación previamente explicada. Una vez que a todos los campos de flujo se les aplicaron las mismas pruebas y bajo las mismas condiciones de operación, podremos considerar los resultados obtenidos. En la tabla 4.1 se muestra la matriz de decisión empleada para la selección del campo de flujo que cumple mejor con los requerimientos establecidos en un principio de la investigación tomando como referencia al campo de flujo comercial.

Selección del campo de flujo con base en el campo de flujo comercial Método DATUM

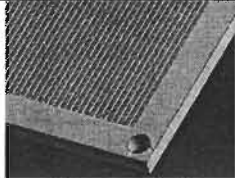
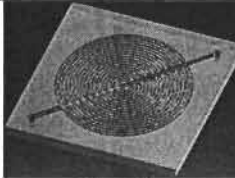
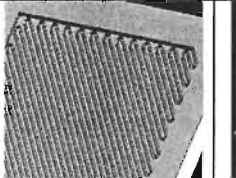
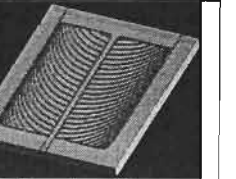
Campo de flujo				
Característica	Comercial	Circular	Triangular	Biomimético
Menor caída de presión ($P_{in} = 2.5[\text{bar}]$ y $Re=1000$)	75050 [Pa]	+	+	NA
Longitud de trayectoria maquinada	2870.2 [mm]	-	+	-
Área cubierta	2296.16 [mm ²]	-	+	-
Distribución a través de los canales		S	S	-
Remoción de agua		+	+	-
Tiempo de Manufactura	45 [min]	+	+	-
suma de +		3	5	1
suma de -		2	0	5
suma de s		1	1	0
		medio	fuerte	débil
Simbología	Caídas de presión para $Re = 1000$ y $P_{in}=2.5$ [bar]			
	Comercial [Pa]	Circular [Pa]	Triangular [Pa]	Biomimético [Pa]
	75050	78215	63048	NA
	Tiempo de Maquinado obtenido de Master CAM®			
+ Mejor resultado	45 min	35 min 2 seg	43 min 30 seg	1hr 20min 8 seg
- Mal resultado				

Tabla 4.1 Matriz de decisión para selección de campos de flujo.

La simbología empleada para la comparación entre campos de flujo, consiste en colocar dentro de las celdas de la matriz, símbolos de más (+) para aquellas especificaciones que son mejor cubiertas por las soluciones propuestas, de menos (-) para el caso contrario y una S en donde los requerimientos se cumplen de igual manera con ambas soluciones. En el caso de la comparación efectuada para esta investigación, se hace uso de las siglas NA que significan que la prueba correspondiente de esa especificación no pudo ser aplicada.

Los parámetros planteados para establecer los puntos de comparación entre los campos de flujo, fueron seleccionados con base en los objetivos que se plantearon para la realización de esta investigación, dentro de los cuales cabe mencionar que la comparación referente a la caída de presión se realizó a partir de una presión fija de entrada para todos los campos con la característica de que para los campos donde existía simetría solo se considero la mitad de la trayectoria total y que en el caso del biomimético no se realizó dicha caracterización una vez que el punto de distribución homogénea dentro de los canales, no fue satisfactoria y no se pudo manejar una longitud característica para este caso en particular.

El aspecto referente al valor de área cubierta toma suma importancia una vez que el valor de corriente extraíble de la celda de combustible dependerá directamente del tamaño del área reactiva útil, esto adicionado al correcto aprovechamiento de los materiales utilizados para el acondicionamiento de la membrana y con esto lograr el máximo desempeño de la celda. En relación a esta cobertura y a la longitud de trayectoria recorrida, es necesario destacar que en la opción del campo de flujo circular se presenta una menor área cubierta ya que, como se puede observar en la ilustración de éste, no cuenta con una cobertura mediante canales en las zonas que, en otras opciones de campos, son cubiertas por las “esquinas”, situación que dentro de este parámetro de comparación lo pone en franca desventaja, sin embargo, esta geometría circular es de gran utilidad durante el ensamble de un “stack” de celdas de combustible, y su colocación dentro de un sistema de generación de energía mediante celdas de

combustible, ya que esta zona no cubierta es aprovechable para la colocación y distribución de los elementos sujetadores de los campos de flujo.

Como resultado de la comparación entre las soluciones propuestas y el campo de flujo de referencia se obtuvo que el campo de flujo que ofrece una mayor área cubierta es el campo de flujo triangular, esto ligado a que también proporciona una mayor longitud de trayectoria recorrida, lo cual puede ser ocasionado por el hecho de que en los cambios de dirección se empleó una línea curva en lugar de una recta (como ocurre en el caso del campo comercial), es decir, se tiene un segmento más largo en esa parte de los canales ya que la línea curva tiene una longitud de arco de 2.8274 [mm] y en cambio la recta mide solo 1.8 [mm].

El otro aspecto considerado dentro de este análisis de resultados obtenidos de la experimentación realizada, es la longitud de trayectoria recorrida, una vez que a mayor longitud de trayectoria recorrida se obtendrá con ello un mayor tiempo de estancia de los gases reactivos dentro de los canales de los campos de flujo y con ello procurar la reacción de una mayor cantidad de gas además de incrementar la calidad de la misma. En este sentido, el campo que tiene una mayor longitud de trayectoria es el campo de flujo denominado triangular, las razones a las cuales se puede deber tales dimensiones son explicadas en párrafos anteriores.

La parte vinculada a la distribución del gas dentro de los campos de flujo va estrechamente relacionada con el tamaño de área activa, ya que al buscar cubrir una mayor área reactiva se desea que este proceso sea lo más homogéneo posible, característica que se pretende satisfacer mediante el diseño de las formas geométricas desarrollado en este trabajo. Esta característica fue calificada a través del proceso de visualización (apartado 3.6 de la investigación), la base utilizada en este sentido para establecer la comparación entre campos fue la observación del comportamiento del fluido de trabajo empleado (agua) para tal

efecto. En este caso la distribución observada en el campo de flujo triangular, en comparación con el campo comercial, resultó ser similar, esto debe ser consecuencia de que la geometría manejada en el campo de flujo triangular, es muy semejante a su contraparte comercial, especialmente porque ambos campos manejan un serpentín, que a pesar de tener algunas modificaciones en el campo triangular, muestran una conducción del fluido a través de un solo canal que lo lleva desde la entrada a la celda hasta su salida.

La remoción de agua es una característica necesaria a cubrir debido a que es primordial que la membrana se encuentre bien humectada sin llegar a un exceso que también es perjudicial para el desempeño de la celda. Este aspecto fue considerado dentro del diseño de los campos de flujo y el cual fue calificado mediante la parte correspondiente a la visualización del flujo.

El tiempo de manufactura repercute directamente sobre el costo de manufactura de los campos de flujo, en especial porque este es elevado globalmente, debido a que el tiempo de máquina de control numérico (CNC) por sí solo es elevado, oscilando aproximadamente de entre 50 y 60 [USdls] por hora de maquinado CNC y un costo de programación de 80[USdls] por hora del mismo. Este aspecto cobra gran relevancia en el impulso proporcionado a las celdas de combustible para la sustitución de las fuentes de energía actuales, una vez que para alcanzar esta meta, la energía obtenida a partir de celdas de combustible deberá ser lo más accesible posible. En cuanto a los resultados que arrojó la investigación realizada, se observa que el campo de flujo que requirió de un menor tiempo de maquinado fue el circular, tal fenómeno puede ser consecuencia del maquinado de una menor trayectoria (la que posee dicho campo), y del recorrido de trayectorias más cortas al inicio del maquinado, ya que en este campo el proceso fue efectuado iniciando por el centro del campo en donde se encuentran ubicadas tales trayectorias; por otro lado, el campo de flujo triangular presenta un tiempo de maquinado muy similar al comercial, sin embargo, al ser menor representa una ventaja para la opción de campo de flujo triangular. Cabe señalar también que el tiempo de maquinado extremadamente grande, requerido para el

procesamiento del campo de flujo “biomimético”, debe ser ocasionado por los múltiples saltos de herramienta y los diversos movimientos rápidos que durante su manufactura necesitaron ser efectuados además de la complejidad de su forma.

Una vez comentados los parámetros a evaluar y al analizar los resultados obtenidos se puede concluir de este trabajo que el diseño que mejores resultados de lo mencionado anteriormente, es el campo denominado como campo triangular, ya que como se muestra en la tabla 4.1 éste ofreció mejores resultados en comparación con el campo comercial en todos los aspectos considerados anteriormente a excepción de la distribución del flujo en el cual se puede observar que se comporta de manera similar al campo utilizado como referencia.

Conclusiones

Como conclusiones del trabajo realizado se puede comentar lo siguiente:

1.- Una vez que el objetivo es desarrollar un campo de flujo que sea capaz de proveer un mejor desempeño en cuanto a caída de presión se refiere y después de analizados los resultados, se observó que el campo de flujo comercial ofreció un mejor desempeño dentro del rango de Reynolds de operación entre 0 y 760, sin embargo, para valores superiores, el campo triangular es el que ofreció los mejores resultados (Tabla 4.1).

2.- Del análisis de las características geométricas, se concluye que el campo triangular es el que mejores resultados ofreció para la longitud total, así como, también una mayor área cubierta dentro del espacio delimitado por el área de 49 [cm²].

3.- Una conclusión más del trabajo, referente a tiempos de maquinado de los campos de flujo, el campo triangular es la opción que permite tener un menor tiempo de producción de los analizados dentro de la investigación realizada, esto con base en los resultados obtenidos del software Master CAM®.

4.- Como resultado del proceso de análisis el campo Biomimético, se concluye que la mejor opción para el flujo del gas dentro de los campos de flujo, es la trayectoria de un solo canal, una vez que se puede tener una mala distribución al presentarse “ramificaciones” de una línea principal, dado que el fluido tiende a “seguir “ la trayectoria de menor resistencia.

Como comentarios finales del trabajo realizado para desarrollos a futuro, se recomienda hacer referencia a las condiciones óptimas de operación de las celdas de combustible, donde hay mucha incertidumbre sobre estos datos, así como

también enfocar gran parte de la atención sobre los sellos de los canales ya que de la experiencia obtenida durante la investigación, este punto es de los mas difíciles de solucionar, debido a que a las presiones de funcionamiento reportadas dentro de la literatura, es muy fácil inducir una deformación en los materiales donde se plasmen los campos, por lo que se recomienda un análisis previo de los materiales a utilizar para las placas de los campos de flujo, considerando la magnitud de deformaciones y con esto tener el conocimiento del material adecuado para que sea aplicado desde el inicio de la investigación y mediante el empleo de sellos o empaques, se logre un mejor seguimiento de las trayectorias seleccionadas.

Haciendo referencia a la utilización de la Biomimética para la creación de campos de flujo y en especial para la creación de campos similares al denominado Biomimético, es necesario modificar la sección de flujo; en este tipo de campo de flujo es conveniente tener una sección que varíe con la longitud recorrida, en un intento por crear mayor resistencia en ciertas zonas críticas para así forzar al fluido a cubrir lo mejor posible el área activa. Este comentario se basa en la observación de las hojas de plantas, donde es fácil identificar la variación de la sección transversal de flujo con lo que se sustenta lo previamente mencionado.

Referencias

- 1.- www.fluent.com (2004).
- 2.- <http://www.cienciateca.com/fuelcells.html>
- 3.- <http://www.ecn.nl/bct/products/pemfc/animations.html>
- 4.- **Fuel cells with flexible graphite bipolar plates.** T. Pykkänen, G.G. Scherer
Combinatorial Discovery of Fuel Cell Electrocatalysts. Eugene S. Smotkin.
- 5.- **Finite Element Structure Design of Fuel Cell Plate.** Rong Zheng, Zuomin Dong
- 6.- **NDE Of Fuel Cells Via Neutron Imaging.** Muhammad Arif ,David Jacobson,
Thomas Gentile, Alan Thompson
- 7.- **Efficient Fuel Cell Systems.** Christine Zawodzinski, Steffen Møller-Holst,
and Mahlon S. Wilson
- 8.- **Three dimensional, two phase flow mathematical model for PEM fuel cell:
Part II. Analysis and discussion of the internal transport mechanisms.**
Mingruo Hu, Xinjian Zhu , Minghua Wang , Anzhong Gu , Lijun Yu
- 9.- **Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad
limpia y eficiente vía electroquímica.** Ulises Cano Castillo
- 10.- **CFX Advances Fuel Cell.** Mds Bang, IRD Fuel Cell.
- 11.- **Constructal Flow structure for a PEM fuel cell.** J.V.C. Vargas , J.C.
Ordóñez , A. Bejan.
- 12.- **Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous
media heat-exchangers.** Pei-Xue Jiang, Ming-Hong Fan, Guang-Shu Si, Ze-Pei
Ren.
- 13.- **Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell
Systems.** Jay T. Pukrushpan Huei Peng1 Anna G. Stefanopoulou
- 14.- **PEM Fuel Cell Design, Engineering, Modeling and Diagnostic Issues.**
Franco Barbir.

- 15.- **Direct Methanol Fuel Cell - In Situ Investigation of Carbon Dioxide Patters in Anode Flow Fields by Neutron Radiography.** A. Geiger, E. Lehmann, P. Vontobel, G.G. Scherer
- 16.- **The effect of channel-to-channel gas crossover on the pressure and temperature distribution in PEM fuel cell flow plates.** P.H. Oosthuizen a,*, L. Sun a, K.B. McAuley b
- 17.- **Fuel Cell Handbook**
- 18.- **Feeding PEM fuel cells.** A.A. Kulikovskya,1, A. Kucernakb, A.A. Kornyshevb,,
- 19.- **Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow Field designs.** Xianguo Li, Imran Sabir
- 20.- **Transportation Fuel Cell Power Systems Program.** www. ott.doe.gov
- 21.- **Cathode Flow Field Geometry in a PEMFC.** Tuomas Mennota.
- 22.- **Measurement of Current Density Distribution in a Free-Breathing PEMFC.** Matti Noponen, Tuomas Mennola, Mikko Mikkola.
- 23.- **Lightweight, High Power Density Fuel Cell Stack.** D. P. Davies, P. L. Adcock
- 24.- **Three dimensional, two phase fow mathematical model for PEM fuel cell: Part I. Model development.** Mingruo Hu a,b,*, Anzhong Gu a, Minghua Wang b, Xinjian Zhu b, Lijun Yu c
- 25.- **A micro methanol fuel cell operating at near room temperature.** T. J. Yen, N. Fang, and X. Zhanga), G. Q. Lu and C. Y. Wang
- 26.- **Model Approach for the Description of Lateral Effects in Large Scale PEFC.** S. Freunberger, F.N. Büchi
- 27.- **Modeling a PEM Fuel Cell Natural Gas Reformer.** Mads Pagh Nielsen and Søren Knudsen Kær
- 28.- **Modifications to a PEM Fuel Cell Stack.** Mikko Mikkola
- 29.- **Optimization of the cathode geometry in polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells.** M. Grujicic, K.M. Chittajallu
- 30.- **PEM Fuel Cell Stack Development and System Optimization.** Zuomin Dong

- 31.- **Flow Field Plate Reliability and Durability.** Brant Peppley.
- 32.- **Infraestructura de uso de hidrógeno y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso.** Ulises Cano Castillo, Leonardo Rejón García, Mirna Ojeda Hernández
- 33.- **A Three-Dimensional Computational Model of PEM Fuel Cell with Serpentine Gas Channels.** Phong Thanh Nguyen
- 34.- **Two-Phase Flow Models for PEM Fuel Cells: Correlation of Experimentals and Model Results.** Trung V. Nguyen, Wensheng He and Dilip Natarajan.
- 35.- **Mecánica de Fluidos.** Frank M. White. Mc Graw-Hill
- 36.- **Apuntes Mecánica y Dinámica de Fluidos.** Dr. Francisco J. Solorio Ordaz
- 37.- **Anemometría de hilo caliente conceptos básicos y operación de anemómetro del laboratorio de termofluidos de F.I. – UNAM.** Dr. Francisco J. Solorio Ordaz
- 38.- **Fluid flow in micro-channels.** G. Hetsroni, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, L.P. Yarin
- 39.- **Micro-flow measurement with a laser diode micro-particle image velocimetry.** C.T. Pan, H.S. Chuang, C.Y. Cheng, C.T. Yang.
- 40.- **Effect of compressibility on gaseous flow in micro-channels.** Yutaka Asako, Tiangi Pi, Stephen E. Turner, Mohammad Faghri.
- 41.- **Shape and Structure from Engineers to Nature.** Adrian Bejan.
- 42.- **Diseño de producto métodos y técnicas.** Jorge Alcalde Marzal, José A. Diego Más, Miguel A. Artacho Ramírez. Alfaomega.

43.- Exergy analysis of a PEM fuel cell at variable operating conditions.

Ayoub Kazim

44.- Three-Dimensional Computational Model of PEM Fuel Cell with Serpentine Gas Channels. Phong Thanh Nguyen