



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

“Diseño estructural de un stack de celdas
de combustible tipo PEM.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTAN:

**REYES FARIAS MARTÍN
ZAPATERO JIMÉNEZ JOSÉ VICENTE**

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. ANTONIO ZEPEDA SÁNCHEZ



MÉXICO, D. F.

2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

AGRADECIMIENTOS

MARTÍN:

A mis padres y en especial a mis hermanos Bety, Lety y Jaime por creer en mi con paciencia, cariño y amistad, por que han sido un soporte donde me he apoyado para logra alcanzar hesta meta que hoy es una realidad.

JOSÉ VICENTE:

Dedico este trabajo, en primer lugar a mis padres, Dolores y Vicente por su apoyo y ejemplo a lo largo de mi vida, en segundo lugar, a mis hermanas, Esthela y Clementina que con su ejemplo me impulsaron para terminar mi formación académica y por último pero no por eso menos importantes, a mi esposa Mirna y mi hijo Sebastián, que son mi mayor aliciente para seguir superándome en todos los aspectos de mi vida y no solo el profesional.

MARTÍN

JOSÉ VICENTE

A nuestra alma mater la UNAM y a la Facultad de Ingeniería.

A nuestros profesores y compañeros que de una u otra forma nos apoyaron.

Al M. I. Antonio Zepeda S. por su apoyo, asesoria y consejos.

Al Dr. Omar Solorza F. por su apoyo.

ÍNDICE

Introducción	i
Justificación	ii
Especificaciones	iii

ANTECEDENTES

A.1 Historia de las celdas de combustible	2
A.2 ¿Qué es una celda de combustible?	5
A.3 Estructura básica de una celda de combustible	6
A.4 ¿Cómo funciona una celda de combustible?	7
A.5 Tipos de celdas de combustible	9
A.6 Principales beneficios de las celdas de combustible	15
A.7 Principales inconvenientes de las celdas de combustible	17

CAPÍTULO I LA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

1.1 Descripción general de una celda de combustible tipo PEM	20
1.1.1 Los electrodos	20
1.1.2 La membrana	23
1.1.3 Ensamble membrana electrodo	24
1.1.4 Capas difusoras de gas	25
1.1.5 Placas colectoras de corriente con campos de flujo	27
1.2 ¿Cómo funciona una celda de combustible tipo PEM?	29
1.3 Stack de celdas de combustible	30
1.4 Aplicaciones de las celdas de combustible	33
1.5 Problemas encontrados en la literatura	34
1.5.1 Baja presión en los múltiples del gas	34
1.5.2 Los pernos de sujeción	35
1.5.3 Problemas de sellado	35
1.6 Geometría de las celdas de combustible	38
1.7 Sistemas auxiliares de una celda de combustible	39

CAPÍTULO II

ANÁLISIS FUNCIONAL

2.1	Análisis funcional de un stack	46
2.2	Análisis funcional del sistema de sellado	49
2.3	Análisis funcional del sistema de sujeción	53
2.4	Análisis funcional del sistema de refrigeración	57
2.5	Análisis funcional del sistema de conexiones eléctricas	61
	Árbol o diagrama de funciones	64
	Diagrama FAST	65

CAPÍTULO III

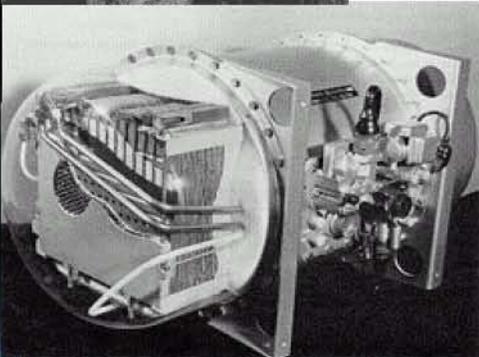
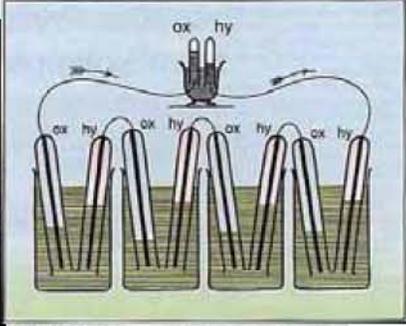
DISEÑO DE DETALLE

3.1	Diseño de detalle	68
3.2	Detalle del sistema de sellado	68
3.2.1	Pautas para el diseño de los sellos axiales	72
3.3	Detalle del sistema de sujeción	75
3.4	Detalle del sistema de refrigeración	83
3.5	Detalle del sistema de conexiones eléctricas	87

CAPÍTULO IV

FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

4.1	Prototipo	96
4.2	Descripción del primer prototipo	96
4.2.1	Resultados de los experimentos con el primer prototipo	98
4.3	Simulación de membranas con hule cristal	99
4.4	Simulación de membranas con mica	100
4.5	Descripción del segundo prototipo	103
4.5.1	Seguimiento para la manufactura del stack	108
	CONCLUSIONES -	111
	APÉNDICE A	115
	BIBLIOGRAFÍA	117



“...creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o en forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor”

JULIO VERNE: “La Isla Misteriosa”

INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación ambiental debido a los cambios climáticos ocasionados por la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, así como de la futura crisis energética de los combustibles fósiles, empiezan a ser tomados en cuenta por grandes compañías del sector energético mundial, que en los últimos años han incrementado en forma considerable sus inversiones en el desarrollo tecnológico de las energías renovables. El alto crecimiento de la demanda de servicios energéticos que tienen, ya hoy en día los países en desarrollo, como Brasil, China, México, India e Indonesia, así como la cercanía del máximo de la producción mundial del petróleo son indicadores que la humanidad está urgida de buscar nuevos recursos energéticos sustentables y limpios.

Las celdas de combustible han sido estudiadas ampliamente en EUA, Canadá, Japón y Europa, también en Brasil, México y otros países latinoamericanos. Estos estudios se han enfocado principalmente a la investigación de la electrocatálisis, desarrollo de materiales y tecnología del Hidrógeno. Sin embargo, hasta el 2001 no se había desarrollado ningún proyecto demostrativo en la región.

Actualmente, las celdas de combustible son una tecnología experimental, por lo tanto, cada sistema es construido a mano utilizando materias primas producidas en pequeñas cantidades. Muchos retos técnicos y de ingeniería aún existen. Pero el mayor problema al que se enfrentan las celdas de combustible es que aún son muy costosas, en parte, por que su producción no es masiva. Se espera que en un futuro cercano, con el mejoramiento de la tecnología y la producción a gran escala de las celdas de combustible, el costo se reducirá considerablemente.

El aumento en el interés tanto nacional como internacional sobre una alternativa tan atractiva como la que ofrecen las celdas de combustible en el empleo del hidrógeno como combustible, crece cada vez más y no solo entre ingenieros y científicos cuyo amplio conocimiento es indiscutible, países como: Norteamérica, Alemania, Japón y otros como Suiza, Noruega, entre otros, están trabajando en el desarrollo de esta tecnología tanto en el sector público como en el privado.

Por lo anterior se genera un gran compromiso para nosotros, participar activamente en él, o los procesos de investigación y aplicación de las nuevas tecnologías que se encuentran en desarrollo, para la generación de energía eléctrica, de una manera segura y libre de contaminantes.

JUSTIFICACIÓN

En México se han logrado construir celdas de combustible tipo PEM a nivel laboratorio. Sin embargo, no se han podido escalar para una mayor potencia, debido al propio funcionamiento de la celda, es decir, se presenta un incremento de temperatura que podría degradar a sus diferentes componentes, otro de los problemas es que los gases encuentran una mayor resistencia debido a una mayor longitud de recorrido.

Para la sujeción de las placas se requiere ejercer una presión uniforme, por este motivo, este trabajo propone soluciones de diseño que se presentan para probar y caracterizar un sistema de celdas de combustible mediante los siguientes objetivos.

OBJETIVOS:

- Diseñar los sistemas estructurales para la construcción de un stack de mayor capacidad que los construidos en el laboratorio
- Diseñar un stack de 5 celdas para conformar un stack de celdas de combustible tipo PEM de acuerdo a las especificaciones que se mencionan a continuación.

ESPECIFICACIONES:

- Constará de tres placas bipolares (internas).
- Constará de dos placas monopolares (externas).
- Sistema de enfriamiento por aire o por agua.
- Sistema de sujeción de placas.
- Fácil desalojo de agua.
- Interconexión de campos de flujo
- Dimensiones:
 - Placa de 6mm de espesor
 - Área de 10 x 10 cm.
 - Área efectiva de trabajo 5 x 5 cm.
- Canal de campo de flujo semicircular de 1.2 mm de diámetro
 - No debe existir mezcla de gases, por lo que se requiere un sistema de sellado

ANTECEDENTES

Desde el advenimiento de la rueda, el interés del hombre por la conservación de la energía, ha alimentado la imaginación de los científicos más reconocidos de la historia e inspirado las invenciones más prácticas y extrañas.

Con la revolución industrial, el renombre del automóvil, la televisión y más recientemente la computadora personal se define la tendencia de la humanidad, por una inclinación hacia las comodidades producidas por la tecnología.

Estos avances tecnológicos asociados a la contaminación ambiental y al agotamiento de las fuentes de energía convencionales, han obligado al hombre a la búsqueda de fuentes alternas de energía para accionar nuestros juguetes y no depender de los combustibles fósiles o de otros recursos no renovables. Es así como durante la segunda mitad del siglo XX, la celda de combustible surge como la fuente de energía alterna más prometedora. Enseguida se menciona una cronología de su evolución.

A.1 HISTORIA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

El desarrollo de las celdas de combustible se remonta al siglo XIX, al trabajo del juez galés (*inventor y físico*), Sir William Robert Grove. (*conocido como el padre de la celda de combustible*), quien en 1839, experimentó con el fenómeno de la electrólisis del agua. Grove pensó que podía ser posible invertir este proceso y generar electricidad por medio de la reacción del oxígeno y del hidrógeno. Para probar esta teoría introdujo dos tiras de platino en botellas selladas y separadas, una que contenía hidrógeno y otra que contenía oxígeno en estado gaseoso. Cuando estos envases fueron sumergidos en ácido sulfúrico diluido, una corriente comenzó a fluir entre los electrodos y el agua se empezó a formar en las botellas del gas. Para incrementar el voltaje, Grove ligó varios de estos dispositivos, y construyó lo que él llamó “*batería de gas*”, (*ver figura A1*), esta no produjo bastante electricidad en esa época para ser útil.



Figura A1 Sir William Robert Grove y una representación de su dispositivo, el cual llamo “*batería de gas*”

El término "**celda de combustible**" fue empleado por primera vez por los investigadores químicos Ludwig Mond y Charles Langer en 1889, mientras que otra fuente indica que fue William White Jaques quien primero utilizó el término "*celda de combustible*." Los primeros trataron de construir el primer dispositivo práctico generando electricidad a partir de la utilización de electrodos de platino poroso y un electrolito de ácido sulfúrico con gas licuado o natural y aire, mientras que White utilizó ácido fosfórico en el baño del electrolito.

Pronto hubo muchos otros científicos tratando de superar las limitantes de esta tecnología para su comercialización, pero el advenimiento del motor de combustión interna y la intensa explotación de los combustibles fósiles, trajo como consecuencia que la invención de Grove fuese relegada a una simple curiosidad científica.

Posteriormente en los años 20s, la investigación de la celda de combustible en Alemania preparó el camino para el desarrollo del ciclo de carbonato y de las primeras celdas de combustible de óxido sólido de hoy en día.

Más tarde un ingeniero de la Universidad de Cambridge, Dr. Francis Thomas Bacon, en 1932 inicia su investigación vital en las celdas de combustible retomando la máquina desarrollada por Mond y Langer y realizando un gran número de modificaciones al diseño original tales como, sustituir los electrodos de platino por electrodos baratos de níquel, también sustituyó el electrolito de ácido sulfúrico por un álcali de hidróxido de potasio, una sustancia menos corrosiva a los electrodos, a este dispositivo lo nombró "*celda de Bacon*" y fue esencialmente, el inicio de la tecnología para las celdas de combustible alcalinas (AFC).

Sin embargo tardaría 27 años en construir una celda de combustible verdaderamente factible y no fue sino hasta 1959 que Bacon construye una celda capaz de producir 5 kilowatts de energía, suficiente para accionar una máquina de soldadura. Evidentemente Bacon no era la única persona que trabajaba en el desarrollo e investigación de las celdas de combustible, en ese mismo año en el mes de octubre el ingeniero Harry Karl Ihrig de Allis-Chalmers Manufacturing Company, un fabricante de equipo de granja, desarrolló el primer vehículo accionado por celdas de combustible, combinando 1008 celdas unitarias las

cuales podían generar 15 kW y eran capaz de accionar un tractor de 20 caballos de fuerza. Estos desarrollos ayudaron a preparar el terreno para la comercialización de esta tecnología.

LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE EN LOS SIGUIENTES 40 AÑOS

La historia reciente de la celda de combustible, inicia a mediados de la década de los 50s, cuando la National Aeronautics and Space Administration (NASA), en su búsqueda de una fuente de energía alterna para accionar los vuelos espaciales, elimina el uso de las baterías por ser demasiado pesadas, mientras que la solar es una energía demasiado costosa y la energía atómica es considerada de alto riesgo, por estas razones comenzó a buscar una fuente alterna de energía. Esta búsqueda condujo al desarrollo de la primera membrana de intercambio protónico cuando el químico Willard Thomas Grubb, que trabajaba para la General Electric (GE), modifica más allá del diseño original, los principios encontrados en la “*celda de Bacon*”, empleando la primera membrana de intercambio iónico, de poliestireno sulfonado como electrolito. Tres años más tarde otro químico de la GE, Leonard Niedrach, ideó una manera de depositar platino en la membrana y ésta se conoció como la celda de combustible de Grubb-Niedrach. La GE desarrolla esta tecnología junto con la NASA, para suministrar de energía eléctrica la cápsula espacial Géminis.

También a principios de los años 60s, la fabrica de aviones Pratt & Whitney con autorización de Bacon, patenta la celda de combustible alcalina. La compañía modifico el diseño original para reducir el peso, desarrollando una celda más duradera que el diseño de la GE. Como resultado, P & W gano un contrato con la NASA, para proveer de estas celdas de combustible a la nave espacial Apolo, desde entonces las celdas de álcali se utilizaron en la mayoría de las misiones subsecuentes, incluyendo los vuelos del Space Shuttle. La NASA encontró en la celda de combustible una solución a su problema, por lo que a concedido un gran número de contratos de investigación para el desarrollo de diseños prácticos. Pero a pesar del gran interés en aplicaciones espaciales, había poco interés en el desarrollo de las celdas de combustible para su aplicación aquí abajo en la tierra.

Sin embargo, a raíz de la crisis del petróleo en 1973, se renueva el interés en la celda de combustible, como una alternativa de los gobiernos para reducir su dependencia de las fuentes de energía derivadas del petróleo y de otros recursos no renovables. A partir de este momento un considerable número de compañías y organismos gubernamentales, comenzaron la investigación formal, tratando de superar los obstáculos para la comercialización de las celdas de combustible.

Durante los años 70s y 80s un enorme esfuerzo de la investigación, fue enfocado a desarrollar los materiales necesarios, identificando la fuente óptima del combustible y reduciendo drásticamente el costo de esta tecnología.

En años más recientes las celdas del combustible han sido instaladas en hospitales y escuelas, también muchas de las principales compañías automotoras han implementado las celdas de combustible para impulsar sus vehículos prototipo, por ejemplo el primer autobús accionado por una celda del combustible, fue terminado en 1993 y algunos de estos ensayos que se han realizado en autobuses accionados por celda de combustible, se han llevado a cabo en Chicago y Vancouver así como en otras ciudades de Norteamérica y Europa. Mientras que la Daimler Benz y Toyota, fabricaron prototipos de autos accionados con celda de combustible hasta 1997.

La preocupación por el agotamiento de las fuentes de energía no renovables y un conocimiento del daño ambiental causado por la quema de combustibles fósiles, ayudará a acelerar la investigación y el desarrollo, de las celdas del combustible para el transporte y las fuentes de energía estacionarias.

Por lo que una curiosidad científica del siglo XIX, puede surgir para ser la fuente de energía del siglo XXI y más allá.

A.2 ¿QUÉ ES UNA CELDA DE COMBUSTIBLE?

Una celda de combustible puede definirse como un dispositivo electroquímico que transforma la energía química de reacción directamente en energía eléctrica cuyo concepto es similar al de una batería convencional. La diferencia fundamental entre las celdas de combustible y las baterías convencionales es que estas son dispositivos de almacenaje y conversión de

energía (*sistema cerrado*) en las que la máxima energía depende de la cantidad de reactivos químicos almacenados en ellas, dejando de producir energía cuando se consumen dichos reactivos. Mientras que las celdas de combustible, por el contrario, son solamente un dispositivo de conversión de energía (*sistema abierto*) en estas, la conversión y la función de almacenaje se separan teniendo la capacidad de producir energía eléctrica de forma indefinida mientras se suministre combustible y oxidante a los electrodos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno como oxidante, este último puede obtenerse directamente del aire. Varias ventajas resultan de la separación de las funciones de almacenaje y conversión, por ejemplo, la libertad de elegir entre diversos combustibles para ser utilizados como fuente de energía del sistema.

Por lo que un sistema de celda de combustible puede usar el hidrógeno contenido en cualquier hidrocarburo que contenga hidrógeno en su molécula, tales como el gas natural, gas LP, metanol, etanol, gasolina o diesel entre otros. Sólo la degradación o el mal funcionamiento de los componentes limitan la vida de operación práctica de las celdas de combustible.

Debido a que la generación de energía eléctrica es directa, la eficiencia que alcanza una celda de combustible puede ser muy elevada, además al no tener partes en movimiento son muy silenciosas. Sumado a todo esto hay que agregar que la celda de combustible no usa la combustión como mecanismo de generación de energía, lo que la hace prácticamente libre de contaminación.

A.3 ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

La estructura básica de una celda de combustible consiste en una capa de electrólito en contacto con un ánodo y un cátodo poroso a cada lado, una sobre la otra: La primera capa es el ánodo, el segundo un electrólito y la tercera capa es el cátodo, (*ver figura A2*).

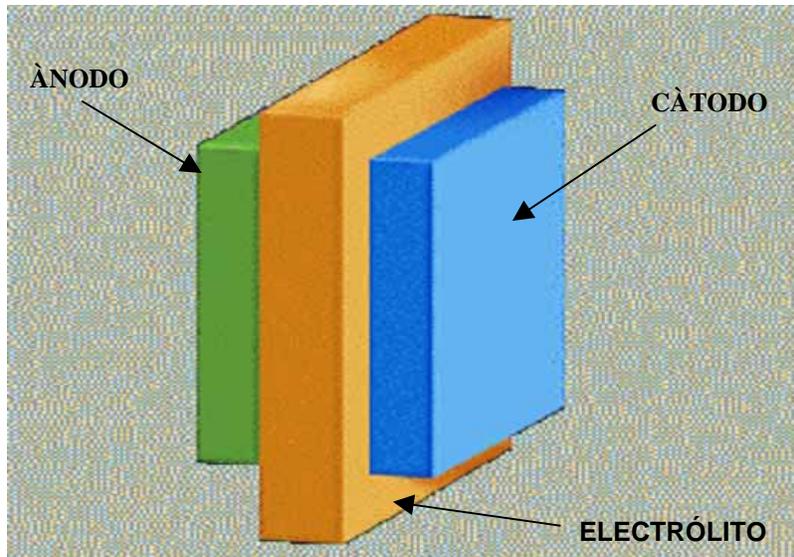


Figura A2 Estructura básica de una celda de combustible.

Las celdas de combustible individuales llamadas también monoceldas generan una cantidad minúscula de electricidad de corriente directa. En la práctica, muchas celdas de combustible individuales pueden y deben combinarse para elevar y producir el voltaje deseado de tal forma que el apilamiento en serie de varias monoceldas se determina en función de la potencia y tensión deseadas, formando de esta manera un conjunto de celdas de combustible que pueden ser fabricadas de distintos tamaños y para distintas aplicaciones que van desde su uso en equipos eléctricos portátiles, hasta la generación y cogeneración en centrales eléctricas.

A.4 ¿CÓMO FUNCIONA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE?

El propósito de una celda del combustible es producir una corriente eléctrica que se pueda ordenar fuera de la celda para hacer el trabajo útil, tal como accionar un motor eléctrico o iluminar una ciudad. Su principio de funcionamiento es inverso al de una electrólisis. En la electrólisis del agua, se separa este compuesto en sus dos componentes, hidrógeno y oxígeno, por medio de una corriente eléctrica, mientras que en una celda de combustible, por el contrario, se

obtendrá una corriente eléctrica por medio de la reacción entre estos dos gases que se unen para formar agua (ver figura A3).

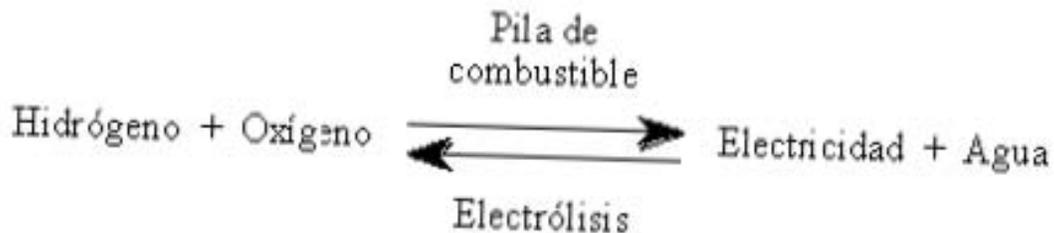


Figura A3 Representación esquemática de la electrólisis del agua y la reacción inversa llevada a cabo en una celda de combustible

El dispositivo es conceptualmente muy simple, como se mencionó con anterioridad una celda de combustible individual está formada por dos electrodos separados por un electrólito, el cual permite el paso de iones pero no de electrones. Cada una de las sustancias que participan en la reacción es alimentada a un electrodo distinto. Así, el combustible generalmente rico en hidrógeno, es alimentado de forma continua al electrodo negativo o ánodo para su oxidación y el oxidante, normalmente el oxígeno del aire, al electrodo positivo o cátodo.

Cuando el hidrógeno fluye por el ánodo, entra en contacto con la capa catalizadora que promueve la separación del gas en protones (iones hidrógeno) y electrones y al ocurrir esto, ambos (*protones y electrones*) toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. Los iones hidrógeno (H^+) migran hacia el otro electrodo a través del electrólito mientras que el electrón (e^-) lo hace a través de un circuito externo, de esta forma se genera una corriente eléctrica entre ambos electrodos. El oxígeno fluye por el cátodo, donde se combina con los protones y los electrones para producir calor y agua (ver figura A4).

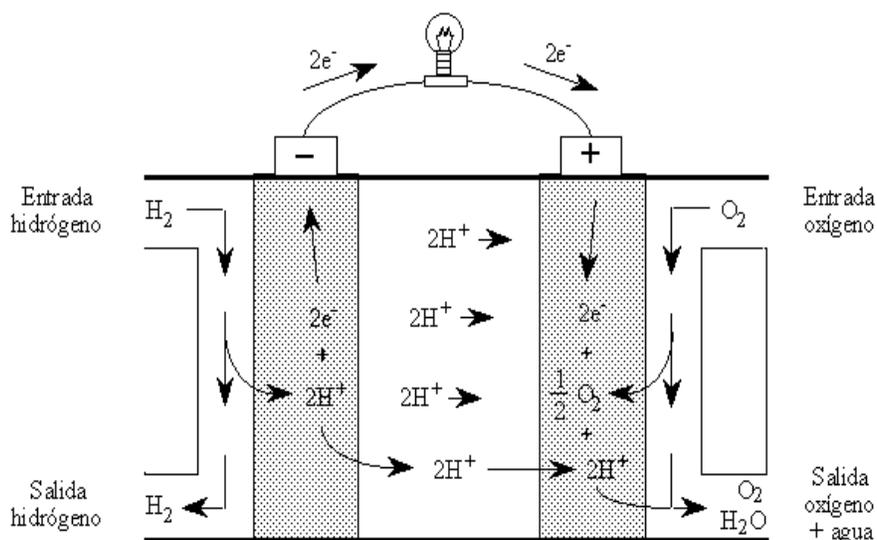


Figura A4 Principio de funcionamiento de una celda de combustible alimentada con hidrógeno y oxígeno.

La reacción global de formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno es espontánea, pero adolece de una cierta lentitud cuando transcurre de forma separada en cada uno de los electrodos. Es por ello que sobre la superficie de los mismos se suelen incorporar catalizadores que aceleran la reacción.

A.5 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

En la actualidad existen diversos tipos de tecnologías para las de celdas de combustible que se distinguen, principalmente por el uso de diferentes tipos de electrolitos con que operan, de las cuales las principales son las siguientes:

- PAFC: Ácido Fosfórico
- PEMFC: Membrana de Intercambio Protónico ó Polímero Sólido
- MCFC: Carbonatos Fundidos
- SOFC: Oxido Sólido
- AFC: Alcalina
- DMCF: Metanol Directo
- PCFC: Cerámico Protónico

Dichas tecnologías se encuentran en diferentes grados de desarrollo precomercial; utilizando diversos tipos de combustible (gas natural o licuado, hidrógeno, metano, etano, etc.), entre otras diferencias.

Cada una de estas tecnologías tiende a ser más apropiada para ciertas aplicaciones (ver figura A5). Por ejemplo, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) han demostrado ser apropiadas para su aplicación en autos, mientras que las celdas de combustible de carbonatos fundidos parecen ser más apropiadas para uso con turbinas a gas en la generación de electricidad.

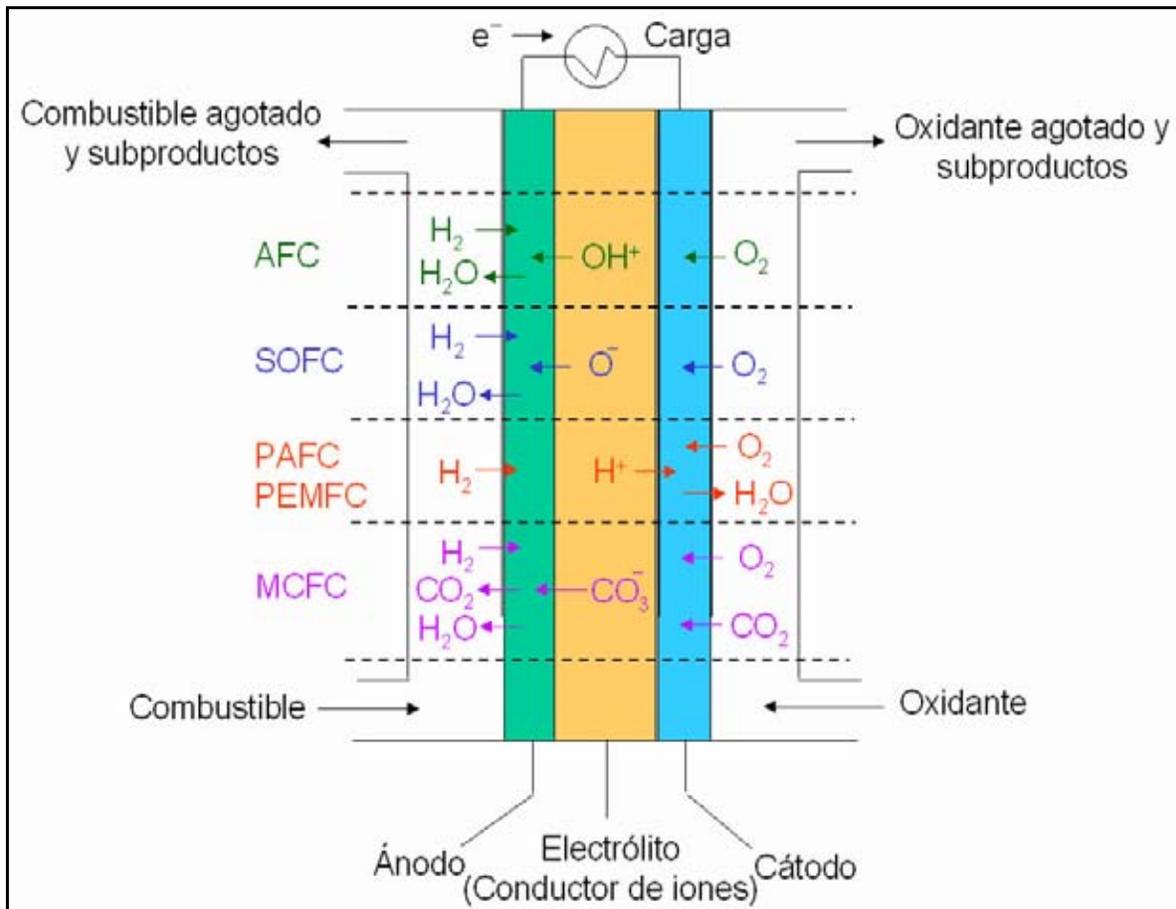


Figura A5 Esquema de los principales tipos de celdas de combustible

En seguida en la tabla 1 se realiza un resumen de las características más importantes de cada una de las tecnologías existentes aplicadas en las celdas de combustible.

TABLA 1 TIPOS DE CELDAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

TIPO DE CELDA	ELECTRÓLITO/ EDO. DEL ELECTRÓLITO	%EFICIENCIA /TEMP. DE TRABAJO °C	COMBUSTIBLE/ CATALIZADOR	PORTADOR DE LA CARGA	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Poliméricas (PEMFC)	Nafión / Sólido	40-50 / 60-100	H ₂ / Platino	H+	Transporte, residencial y equipos portátiles	baja Temperatura arranque rápido (reduce corrosión, fugas,	. Requiere catalizadores caros (Pt) y H ₂ puro.
Alcalinas (AFC)	KOH/ Líquido	70	H ₂ / Platino	OH-	militares espaciales	Arranque rápido debido a su rápida reacción catódica.	Requiere eliminar el CO ₂ de aire y combustible
Ácido fosforico(PAFC)	H ₃ PO ₄ / Líquido	40-85* / 150-200	H ₂ / Platino	H+	Plantas eléctricas y vehículos grandes	Posibilidad de usar H ₂ impuro como combustible.	Corriente y potencia bajas. Peso y tamaño elevados.
Carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos de li, Na, K/Líquido	50-85*/ 600-1000	CO ₃ ⁻² / Níquel	CO ₃ ⁻	Generación de potencia estacionaria	Ventajas derivadas de las altas temperaturas.	altas temperaturas aumentan corrosión y
Óxidos sólidos (SOFC)	ZrO ₂ /sólido	50-85* / 800-1000	H ₂ / Itria	O ⁻	Generación de potencia estacionaria	ventajas deriv. de altas Temp. el electrólito sólido reduce corrosión, fugas,	Altas temperaturas facilitan ruptura de componentes (sellos...)
Metano directo (DMCF)	Nafión / sólido	< 40 / 50-100	CH ₃ OH/**	H+	transporte equipos portátiles	combustible líquido, más cercano a la tecnología actual, más las ventajas de las PEM.	**
Cerámico protónico (PCFC)	**/sólido	**/700	H ₂ / **	**	**	**	**

* Rendimientos alcanzados con cogeneración

** Datos no disponibles

Polímero Sólido ó Membrana de Intercambio Protónico (*PEMFCs*)

Estas celdas trabajan con un electrólito del polímero en forma de una hoja fina permeable que operan a relativamente a bajas temperaturas, tienen una alta densidad de potencia, pueden variar rápidamente su salida para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial rápida, como lo son las residenciales, comerciales, de transporte e industria liviana. 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 el reemplazamiento de baterías recargables en vídeo cámaras". Este tipo de celda de combustible es, sin embargo, sensible a impurezas presentes en el combustible por lo que es necesario purificarlos. La salida de la celda generalmente está en el rango de 5 W a 250 kW.

Ácido fosfórico (*PAFCs*)

Este es el tipo de celda de combustible más desarrollado a nivel comercial ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y una terminal aeroportuaria. Más de 200 sistemas de celda de combustible han sido instalados alrededor del mundo. Las PAFCs pueden tolerar concentraciones de CO de hasta 1.5 %, lo cual amplía la elección de combustibles que pueden ser usados. Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes tales como autobuses y locomotoras. Las PAFCs existentes tienen salidas de hasta 200 kW y unidades de 1 MW han sido probadas.

Carbonato Fundido (*MCFCs*)

Las celdas de combustible de carbonato fundido prometen altas eficiencias combustible-electricidad y la habilidad para consumir combustibles base carbón. A la fecha, las MCFCs han sido operadas con hidrógeno, monóxido de carbono, gas natural, propano, gas de relleno sanitario, diesel marino y productos simulados de la gasificación de carbón. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 1200 °F. Las celdas de combustible de carbonatos estacionarias han sido exitosamente

demostradas en Japón e Italia y algunas unidades para demostración están siendo probadas en los Estados Unidos.

En las primeras fases del desarrollo de estas celdas, utilizaron ánodos de níquel porosos, sin embargo se han ido sustituyendo por aleaciones Ni-Al o Ni-Cr para minimizar los problemas de corrosión que aparecían durante el funcionamiento. Como material catódico utilizan NiO, que resulta bastante activo en la reducción del oxígeno debido a que la velocidad del proceso resulta suficientemente elevada. Un problema asociado a la operación prolongada es que el níquel se va disolviendo lentamente y llega a formar filamentos entre cátodo y ánodo con el consiguiente cortocircuito interno. Es importante tener en cuenta que los procesos de corrosión, sellado y expansión térmica de la propia celda son importantes a las temperaturas de operación de las celdas de MC. Como material de la propia celda se emplean aleaciones de Fe, Ni y Co o de Al y Cr, debido a que resultan más estables que el acero inoxidable (SS) estándar. Se han probado MFCs de 10 kW hasta 2 MW usando una gran variedad de combustibles y están dirigidas principalmente a aplicaciones de generación de potencia estacionaria.

Óxido Sólido (SOFCs)

Otra celda de combustible altamente prometedora, es la de óxido sólido, que 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 automotores. Un sistema de óxido sólido generalmente utiliza un material cerámico de óxido de zirconio sólido y una pequeña cantidad de itrio, en lugar de un electrólito líquido, permitiendo altas temperaturas de operación. Se han desarrollado varias geometrías de las celdas de SO. La geometría cilíndrica de las celdas de SO, desarrollada por Siemens-Westinghouse, ofrece la ventaja de una estabilidad térmica elevada y no requiere cierres herméticos resistentes a elevadas temperaturas. El diseño plano es más eficiente y económico que el cilíndrico debido al menor recorrido del flujo gaseoso, al mismo tiempo que su escalado resulta más fácil. No obstante, los cierres resultan más complejos en esta configuración. Los diseños tubulares de celdas

SO, están más próximos a su comercialización y están siendo producidos por varias compañías alrededor del mundo. Los proyectos demostrativos de la tecnología tubular de SOFC han producido hasta 220 kW. Japón cuenta con dos unidades de 25 kW en línea y una planta de 100 kW están siendo probadas en Europa.

Alcalinas (AFCs)

Estas celdas utilizadas desde hace mucho tiempo ya por las misiones espaciales de la NASA. Fueron usadas en las naves Apolo para proveer electricidad y agua para beber. Estas celdas utilizan una solución acuosa alcalina de hidróxido de potasio (*KOH*) como electrólito, en el que la velocidad del proceso de reducción del oxígeno es muy elevada. Esto es ventajoso pues la reacción del cátodo es más rápida en un electrólito alcalino, lo que significa mayor desempeño.

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. Típicamente tienen una salida de 0.3 a 5 kW.

Metanol Directo (DMFCs)

Estas celdas son similares a las celdas PEM ya que ambas usan una membrana de polímero como electrólito. Sin embargo, en las celdas de metanol directo, el catalizador del ánodo mismo obtiene el hidrógeno del metanol líquido, eliminando la necesidad de un reformador de combustible. Las eficiencias se espera sean de alrededor del 40% con este tipo de celdas, las cuales típicamente operan a una temperatura de entre 120-190° F ó 50 –100° C. Este es un rango de temperaturas relativamente bajo, haciendo a este tipo de celda atractiva para aplicaciones desde muy pequeñas hasta tamaños medios, por ejemplo energizar teléfonos celulares o laptops. Mayores eficiencias pueden obtenerse a mayores temperaturas. Sin embargo, un problema serio, es la permeabilidad del combustible desde el ánodo hacia el cátodo sin generar electricidad. No obstante, muchas compañías han dicho haber resuelto este problema. Estas se encuentran trabajando con prototipos de DMFC utilizados para energizar equipo militar electrónico en campo.

Cerámico Protónico (PCFCs)

Este nuevo tipo de celda de combustible esta basado en un material de electrólito de cerámico protónico que presenta una alta conductividad protónica a elevadas temperaturas. Las PCFCs comparten las ventajas térmicas y cinéticas de la operación a alta temperatura de 700 °C con las celdas de carbonatos fundidos y de óxido sólido, al mismo tiempo que muestra los beneficios intrínsecos de la conducción protónica en electrólitos de celdas poliméricas y de ácido fosfórico (PAFCs). La alta temperatura de operación es necesaria para alcanzar la alta eficiencia eléctrica del combustible con combustibles a base de hidrocarburos. Las PCFCs pueden operar a altas temperaturas y oxidan electroquímicamente combustibles fósiles directamente en el ánodo. Esto elimina el paso intermedio de producción de hidrógeno mediante costosos reformadores. Las moléculas gaseosas del combustible de hidrocarburo son absorbidas sobre la superficie del ánodo en presencia de vapor de agua, y los átomos de hidrógeno son eficientemente arrancados para ser absorbidos hacia el electrólito, produciendo como producto principal de reacción dióxido de carbono. Adicionalmente, las PCFCs tienen un electrólito sólido que no se “seca” como en las celdas PEM, ni puede fugarse como en las PAFCs.

A.6 LOS PRINCIPALES BENEFICIOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible ofrecen una serie de ventajas respecto de los sistemas tradicionales de producción de energía. Entre las más importantes se pueden señalar las siguientes:

Confiabilidad. Al no existir partes móviles se reducen los gastos por mantenimiento y fallas. El usuario o consumidor dispondrá de energía de back up (*emergencia en caso de falla de la red*) o podrá generar su propia energía eléctrica de acuerdo a sus propios requerimientos. Los sistemas informáticos de control permiten automatizar el funcionamiento de una celda de combustible, siendo mínima la intervención manual requerida.

Los sistemas de hidrógeno tienen una historia de seguridad muy impresionante. Además de disiparse rápidamente en la atmósfera si existiera

alguna fuga, el hidrógeno, en contraste con los otros combustibles, no es tóxico en absoluto.

Alta eficiencia energética. Sus altas eficiencias alcanzan el 80% cuando además de electricidad se recupera calor utilizando sistemas de cogeneración.

Este valor supera ampliamente las eficiencias de otros sistemas convencionales los cuales alcanzan un 30% en promedio.

Flexibilidad de operación. En lo referente a generación estacionaria, las celdas de combustible son ideales para generación de potencia, ya sea conectadas a la red eléctrica para suministrar potencia suplementaria y aseguramiento de respaldo para áreas críticas, ó bien instaladas como generadores independientes de la red para servicio on-site en áreas que son inaccesibles mediante líneas de potencia.

Otra de las ventajas es que pueden conectarse en paralelo para suplir cualquier requerimiento energético. Las celdas de combustible conectadas a un procesador, permiten obtener energía a partir de combustibles comunes y corrientes como alcoholes, gas natural y combustibles de origen fósil, así como también a partir de biomasa o de la fracción orgánica recuperada de residuos sólidos domiciliarios.

No producen contaminación. Las celdas de combustible que operan con hidrógeno derivado de fuentes renovables de energía emitirán principalmente calor y vapor de agua, podrían reducir dramáticamente la contaminación del aire en zonas urbanas. Ya que las celdas de combustible operan silenciosamente, reducen la contaminación por ruido así como la contaminación del aire, además, el calor subproducto de las celdas de combustible puede proveer agua caliente ó calefacción.

Modularidad. Las celdas de combustible se pueden fabricar en cualquier tamaño. Tan pequeñas como para un celular o tan grandes como para generar energía para una comunidad entera. Esta modularidad permite aumentar la energía de los sistemas según los crecimientos de la demanda energética reduciendo drásticamente los costos iniciales. La disponibilidad de las celdas de combustible como módulos independientes supone una ventaja adicional, ya que

un cambio de escala en la potencia requerida se consigue fácilmente mediante la interconexión de módulos.

Aspecto económico. Es de gran relevancia, los precios de las celdas de combustible, ya que no son altos cuando se compara con los gastos anuales de electricidad y gas natural, con lo que su compra se amortiza en pocos meses.

A.7 PRINCIPALES INCONVENIENTES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Frente a estas ventajas evidentes, el empleo de celdas de combustible como fuente de energía eléctrica presenta algunas desventajas.

Disponibilidad. No se dispone de una red de distribución de hidrógeno considerado el combustible principal para las diferentes celdas de combustible.

Tecnología emergente. Determinados problemas aun no resueltos afectan al funcionamiento de las celdas de combustible, especialmente en lo que respecta a su vida útil, lo que repercute en su comercialización.

Alto costo. Al tratarse de una tecnología en desarrollo los materiales con los que se fabrican las celdas son costosos y al existir todavía una baja demanda de unidades, su precio no puede, hoy en día, competir con el de las tecnologías convencionales. Es de esperar que, conforme la demanda se incremente, los precios se vayan equiparando.

Sensibilidad hacia los venenos catalíticos. Los electrodos empleados incorporan catalizadores para favorecer el desarrollo de las reacciones electroquímicas. El contacto de estas sustancias con los llamados venenos catalíticos, tales como el monóxido de azufre o los compuestos de azufre, provocan su inactivación irreversible. En la actualidad se trabaja en la sustitución de estos catalizadores por materiales más resistentes o más tolerantes a los venenos catalíticos.

CAPÍTULO 1

LA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

(Proton Exchange Membrane Fuel Cell o PEMFC)

La celda de combustible de membrana de intercambio protónico (*PEMFC*) es una de las tecnologías relativamente más recientes y prometedoras. Las primeras aplicaciones estaban limitadas a sistemas militares y espaciales, además de otros usos como plantas de emergencia en hospitales, donde el costo no es un problema pero que se requiere de un funcionamiento excepcional.

Éste tipo de celda de combustible ofrece densidades de corriente mucho mayores que las de cualquier otro tipo de celdas de combustible, con excepción a algunas celdas alcalinas desarrolladas especialmente para aplicaciones espaciales. Las celdas tipo PEM pueden ser alimentadas por hidrógeno puro o por combustibles reformados y con oxígeno el cual se obtiene directamente del aire. Su temperatura de funcionamiento es baja y no requiere aislamientos térmicos. Los últimos avances apuntan hacia la posibilidad de una gran reducción de costos de esta tecnología.

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

Los componentes básicos de una celda combustible tipo PEM son: dos electrodos impregnados con catalizador, en una membrana conductora de protones, capas difusoras de gas y finalmente las placas colectoras de corriente con campos de flujo. Los cuales se describen cada uno a continuación, tanto en su función, materiales y evolución así como su ubicación dentro de la celda de combustible (ver figura 1.1).

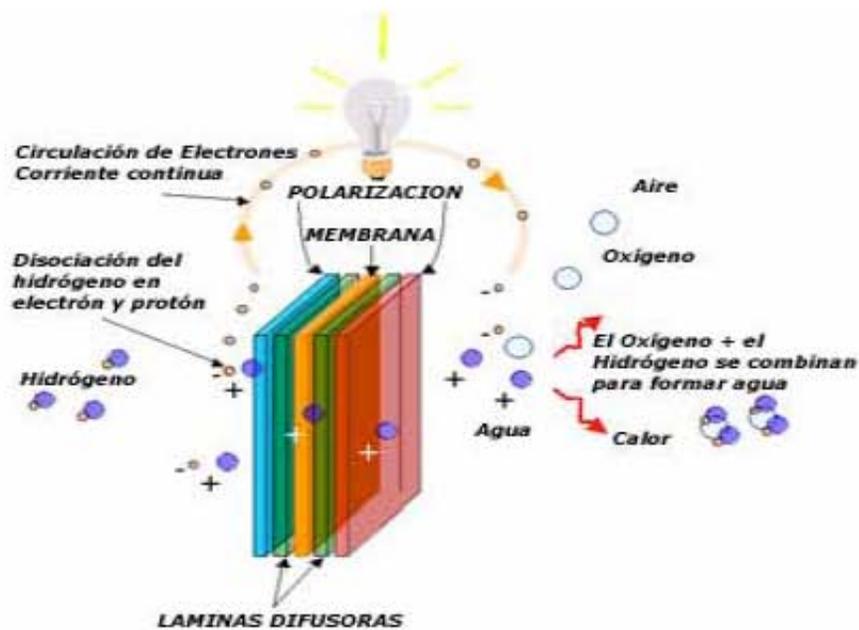


Figura 1.1 Esquema básico de una celda de combustible tipo PEM

1.1.1 LOS ELECTRODOS

Los electrodos de una celda de combustible tipo PEM, el ánodo y el cátodo se preparan aplicando una pequeña cantidad de metal noble, como catalizador en una superficie porosa de grafito la cual a sido previamente impermeabilizada con teflón, esta es una capa delgada con un espesor que va de los 5 a 50 μ m. Debido

al alto costo de los metales nobles, es esencial alcanzar un bajo contenido de metal en los electrodos.

Una meta esencial en el desarrollo de los electrodos es maximizar la utilización del catalizador o bien reducir el cargamento del catalizador de los electrodos esto último ha conducido al desarrollo de electrodos de capa fina los cuales tienen un espesor de entre los 5 y los 15 μm (ver figura 1.2). En el que la técnica más usada es el método de la tinta, en el cual el carbón “vulcan” se mezcla con el catalizador apoyado en Nafión líquido y otros solventes para después ser distribuido en la superficie de la membrana para formar el electrodo por rociadura.

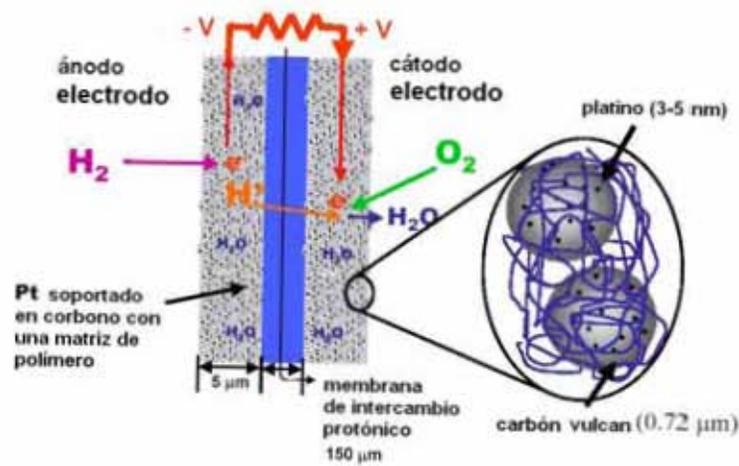


Figura 1.2 Representación de los electrodos de capa fina

Antes de la introducción de electrodos de capa fina, el catalizador era impregnado en los electrodos por el método de la difusión del gas, dando malos resultados, por el uso ineficaz de metales nobles y un contacto deficiente entre el electrodo y la membrana. Por lo tanto, los electrodos fabricados por el método de la difusión del gas se están abandonando, sobre todo en favor de los electrodos de capa fina, que también son aconsejables para la fabricación en masa.

El ánodo: Es el electrodo negativo de la celda de combustible. En él las moléculas del hidrógeno gaseoso, se disocian perdiendo sus electrones formando de esta manera los iones hidrógeno (H^+), este proceso es posible gracias al catalizador, contenido en el ánodo. Los electrones liberados son conducidos hacia un circuito externo, dando lugar a una corriente eléctrica, la cual es captada para realizar un trabajo útil.

El cátodo: Es el electrodo positivo de la celda de combustible, conduce los electrones detrás del circuito externo. En él se lleva a cabo la reducción del oxígeno y la recombinación con los electrones y los iones hidrógeno con el oxígeno para formar agua y calor.

El catalizador: Es un material especial que facilita la reacción del oxígeno y del hidrógeno, su función es una de las más importantes, ya que sin él no habría ninguna reacción electroquímica. El catalizador tiene como función esencial promover la oxidación del hidrógeno en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo de la celda. Esta capa catalizadora está en íntimo contacto con la membrana polimérica y se hace generalmente del polvo de platino muy fino revestido sobre el papel carbón o el paño para alcanzar una mayor velocidad de reacción a bajas temperaturas. El platino ofrece el mejor desempeño, cuando el hidrógeno puro se utiliza como combustible, pero la adición de otros metales nobles como Ru, Ir, Re, Rh, Mo, Pb mejoran sustancialmente el comportamiento del catalizador cuando se le incorporan pequeñas cantidades de estos metales, que pueden realzar la tolerancia del catalizador contra las impurezas que pudiera presentar el combustible.

Para que las densidades de corrientes solicitadas sean obtenidas, la cantidad requerida de área superficial del catalizador debe ser considerablemente mayor comparada con el área geométrica del electrodo, para que tal propósito se logre el electrodo debe por lo tanto ser una red tridimensional áspera y porosa para poder exponer el área superficial máxima del platino al hidrógeno o al oxígeno.

Para poder lograr reacciones eficaces, las partículas del catalizador se deben establecer de tal manera que formen un límite trifásico, es decir las

partículas del catalizador deben estar en contacto con los conductores eléctricos y protónicos.

1.1.2 LA MEMBRANA

La membrana polimérica conductora de protones es el elemento más esencial de las celdas tipo PEM. Esta membrana que sirve como electrólito, es un material especialmente tratado, el cual permite el paso solo de los iones H^+ al cátodo, bloqueando el paso de los electrones.

Los materiales utilizados para este tipo de membranas son polímeros fluorocarbonados parecidos al teflón, al cual se le añaden "*sulfonic acid groups*".

En los que las moléculas ácidas se fijan en el polímero y no pueden separarse, pero los protones de estos grupos ácidos pueden migrar a través de la membrana.

Este polímero intercambiador de protones, debe tener una alta conductividad protónica, una buena estabilidad química y una buena estabilidad mecánica, una permeabilidad al agua pequeña y un bajo costo. Además debe aislar eléctricamente y no ser permeable a los gases de H_2 y O_2 . Por lo que el material más extensamente usado y que cubre los requisitos antes mencionados es la membrana Nafión fabricada por E.I. DuPont de Nemours & Company (*ver figura 1.3*). La estructura de este polímero consiste en una espina dorsal del politetrafluoroetileno. Estas membranas de Nafión están disponibles en varios groesos que se extienden a partir del 50 a 254 μm . Tanto el Nafión como otros materiales comúnmente usados de la membrana deben permanecer hidratados para ser conductoras del protón, por lo que se hace necesaria la presencia del agua, siendo esta una parte central en el desarrollo de la PEMFC. El requisito para mantener la membrana hidratada restringe la operación de la celda a las temperaturas por debajo del punto de ebullición del agua. La falta de humedad en la membrana reduce perceptiblemente la conductividad de esta y aumenta la pérdida ohmica total de la celda.

Las ventajas del electrólito sólido incluyen ausencia de pérdidas de electrólito, energía de alta densidad y la carencia de los problemas de la corrosión por la inestabilidad de electrólitos líquidos, que al reaccionar producen bióxido de carbono, siendo esta una ventaja significativa de las celdas de combustible tipo PEM comparadas con otro tipo de celdas.

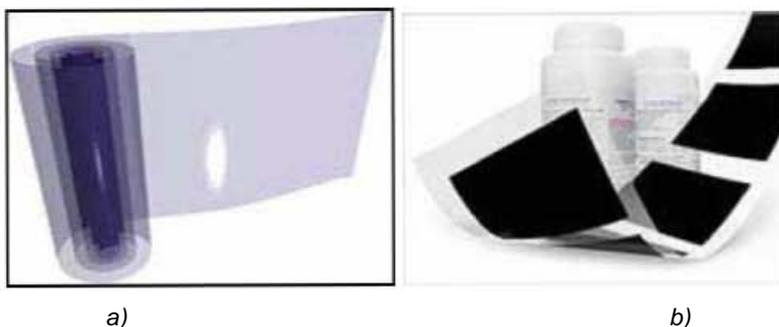


Figura 1.3 Diferentes aspectos de la membrana de intercambio protónico la primera imagen, **a)** corresponde a la membrana sola, **b)** corresponde a la membrana con electrodos ya impresos.

El desarrollo e investigación está en curso por varios grupos de investigación para crear nuevos materiales para la membrana. Las tendencias en la investigación de la membrana está en bajar los costos y en el desarrollo de materiales que permitan la operación de la celda sobre el punto de ebullición del agua.

1.1.3 ENSAMBLE MEMBRANA ELECTRODO (MEA)

Cuando la membrana es situada entre los dos electrodos, y los tres componentes se sellan a presión, se forma lo que se llama un MEA (*Membrane Electrode Assembly*), por sus siglas en inglés.

El MEA es considerado el corazón de la celda, está constituido por este ensamble y mide menos de un milímetro de espesor. Las propiedades catalizadoras de éste conjunto, producen la división de las moléculas de hidrógeno y oxígeno, que se basan en las propiedades de metales preciosos como el platino.

Debido a que esta estructura es extremadamente compacta, la densidad de energía de una celda de combustible tipo PEM, puede ser muy alta. Por lo tanto, las PEMFC se ven generalmente superiores, comparadas con otro tipo celdas de

combustible, dentro de los usos en los cuales la densidad de energía es una consideración primaria (*ver figura 1.4*).

Debido a que la temperatura de funcionamiento es relativamente baja, los catalizadores son esenciales para alcanzar un buen funcionamiento. Por lo que los MEAs han sido fabricados tradicionalmente impregnando la capa porosa de la difusión del gas con la tinta del catalizador, los cuales se colocan generalmente cerca de los revestimientos laterales de la membrana.



Figura 1.4 Vista de MEA = Ensamble Membrana Electrodo.

1.1.4 CAPAS DIFUSORAS DE GAS

Las capas difusora de gas, se fabrican de tejido de carbón o de papel carbón poroso, que es tratado con politetrafluoroetileno (*PTFE*) para hacerlo hidrofóbico del lado opuesto a la membrana. La función de estos componentes es proporcionar la difusión de los gases permitiendo su acceso directo y uniforme a la región del catalizador sin que éstos se tengan que difundir a través de capas de agua líquida y formar un contacto electrónico y térmico entre los electrodos y las placas de campos del flujo.

El lado hidrofóbico retiene el paso de agua líquida desde la membrana hacia el exterior del MEA, impidiendo el taponamiento de los accesos del gas entrante y la pérdida excesiva de humedad en la membrana, la cual requiere estar saturada de agua para tener su máxima conductividad iónica.

Las características deseables para un material de la capa de la difusión del gas son alta conductividad eléctrica y térmica, alta porosidad, una combinación

óptima de características hidrofóbicas e hidrofílicas, esto es que debe permitir a los reactivos ser difundidos a los electrodos, al mismo tiempo, debe permitir la salida del agua formada en el cátodo, debe tener buena resistencia química y mecánica, durabilidad, y bajo costo. La resistencia al flujo en un estado seco debe ser reducida al máximo y la conductividad eléctrica ser maximizada. Para alcanzar una combinación óptima de estas características, varios autores recomiendan una estructura que consista en una capa macroporosa (*forro*) y una capa microporosa (*difusora*) la capa macroporosa puede ser aplicada a uno o ambos lados de los electrodos. La capa más cercana al electrodo debe tener una estructura más fina para asegurarse que el mayor número de partículas posibles del catalizador estén en contacto eléctrico con la capa difusora del gas. Las capas se llaman capa difusora y capa de soporte, respectivamente. El grueso típico de materiales comercialmente disponibles está en un rango de 300 a 400 μm .

Además del carbón tradicional usado en las capas de la difusión del gas, el sinter o el acoplamiento de materiales metálicos pueden ser ventajosos en algunos usos. La rigidez mecánica de materiales metálicos puede abrir nuevas posibilidades en diseño de la celda, porque el material no requiere el mismo grado de ayuda mecánica que los papeles carbón. La rigidez de materiales metálicos es también ventajosa en diseños normales de la celda, porque las capas de la difusión del gas están bajo presión en una celda de combustible montada. Los materiales basados en carbón son deformados fácilmente, dando por resultado porosidad reducida y un transporte total menor, mientras que los materiales metálicos pueden soportar altas cargas de compresión sin la reducción de porosidad.

Los materiales metálicos, sin embargo, tienen sus propios problemas característicos. Su conductividad entre las interfaces materiales, es generalmente menor que la de los materiales basados en carbón de alta calidad. Los metales No-nobles son propensos a los problemas de la corrosión mientras que el uso de metales nobles es limitado por su costo. Por estas razones, los materiales basados en carbón se han elegido tradicionalmente para PEMFCs. Sin embargo, solamente pocos estudios publicados existen en el uso de las capas metálicas de

la difusión del gas en las celdas de combustible. La selección de un material óptimo todavía necesita confiar sobre todo en el ensayo y error.

1.1.5 PLACAS COLECTORAS DE CORRIENTE CON CAMPOS DE FLUJO

Las placas con campos de flujo, son maquinadas para contener canales, que proporcionan un paso para la distribución de los gases reactantes a los electrodos y el retiro del agua del producto, además reúnen la corriente generada a ambos lados de la membrana, la cual es transferida mediante los difusores de gas hacia las placas con campos de flujo que también sirven como colectoras de corriente. Por lo que este componente debe ser de un material con una alta conductividad eléctrica y térmica, también actúan como separadores de los reactivos de las celdas adyacentes, en cuyo caso tendrán que ser, impermeables a ambos gases, (hidrógeno y oxígeno), debe tener buenas propiedades mecánicas ya que es, en gran medida, la estructura de 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 en un arreglo de varias monoceldas. Por lo que el MEA y las capas de la difusión del gas están situados entre las placas con campo del flujo, debe ser químicamente estable al estado de las condiciones de la celda de combustible, debe también ser barato y satisfacer los requerimientos para su fabricación en grandes cantidades, por lo que debe ser fácilmente maquinable para su manufactura y maquinado de los campos de flujo, o bien, tener propiedades adecuadas para su vaciado por moldeo.

Los requisitos teóricos para un material de la placa bipolar, aparte de la conveniencia para la fabricación son satisfechos adecuadamente por el grafito, cuando su porosidad natural se bloquea con la impregnación de alguna resina u otro tratamiento conveniente. Las placas bipolares maquinadas de grafito sólido se han utilizado tradicionalmente en apilados prototipo. El grafito sólido, sin embargo, tiene un precio elevado en términos de la fabricación.

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. Por lo que una gran parte de las investigaciones en las PEMFC, se dirigen a encontrar materiales y métodos de producción más baratos.

Otro aspecto importante que debemos tomar en cuenta es la geometría del canal del campo del flujo, los cuales afectan perceptiblemente la eficiencia de la celda. La geometría óptima del canal puede ser diferente en cada lado de la placa bipolar. La elección de la geometría es muy crítica en el lado del cátodo, por el agua de la reacción que se produce y porque la difusividad del oxígeno es perceptiblemente más baja que la del hidrógeno, sin embargo, la geometría del flujo del lado del ánodo puede también tener implicaciones importantes en la distribución sobre el área activa de la celda (*ver figura 1.5*).

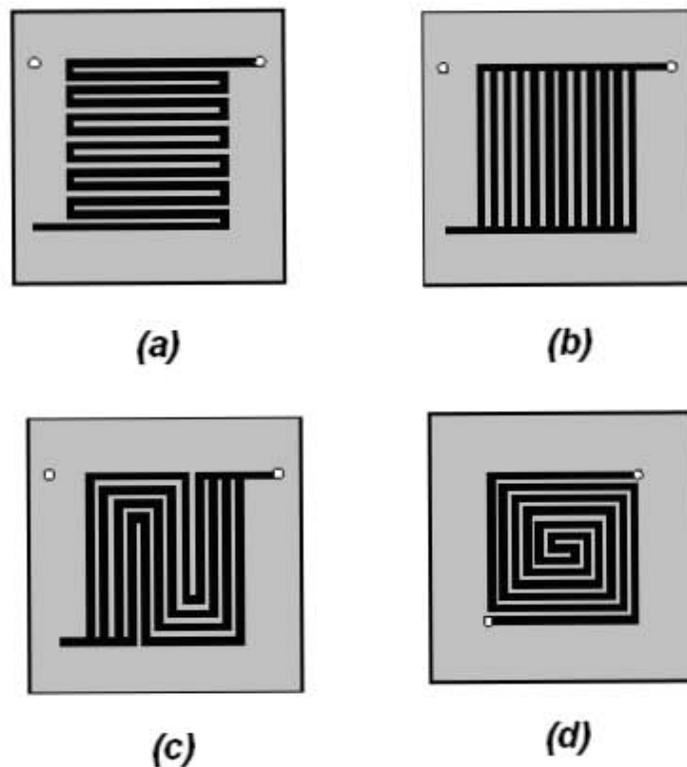


Figura 1.5 Diferentes tipos de geometrías del canal en las placas colectoras de corriente con campos de flujo. (a) Geometría de serpiente . (b) Geometría paralela, (c) Geometría serpiente paralela, (d) Geometría espiral

En la optimización de la geometría del canal, se debe alcanzar un equilibrio entre el número de restricciones y de requisitos, ya que los canales del campo de flujo de la placa deben distribuir los gases reactivos con eficiencia a la región activa de los electrodos.

1.2 ¿CÓMO FUNCIONA UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM?

La reacción total que ocurre en la PEMFC es la reacción del hidrógeno con el oxígeno para producir electricidad, calor y el agua. Cuando el gas de hidrógeno presurizado ingresa a la celda de combustible en el lado del ánodo, la molécula de hidrógeno (H_2) entra en contacto con el platino (*catalizador*) contenido en la membrana, provocando la disociación de las moléculas de H_2 , en protones H^+ y electrones. La membrana tiene la propiedad de ser permeable a los protones, por lo que la atraviesan. Mientras que los electrones (e^-) que no pueden atravesar la membrana circulan por el espacio entre canales hacia el cátodo a través de un elemento conductor externo, dando lugar a una corriente eléctrica (que hace el trabajo útil tal como dar vuelta a un motor).

Mientras tanto, en el lado del cátodo de la celda de combustible, el oxígeno (O_2) procedente del aire o alguna otra fuente entra en contacto con el catalizador, donde forma dos iones (O_2^-) de oxígeno. Cada uno de estos átomos tiene una carga negativa fuerte. Esta carga negativa atrae a los iones H^+ que pasan través de la membrana, que se combinan con un átomo de oxígeno y dos de los electrones del circuito externo para formar moléculas de agua (H_2O). De esta manera, se utiliza el proceso natural de producción de agua por medio de la oxigenación de hidrógeno, para producir electricidad y calor. Este principio se ilustra a continuación (*ver figura 1.6*).

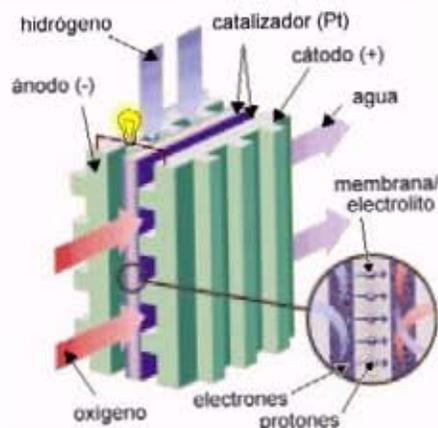
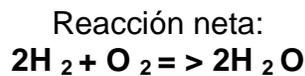
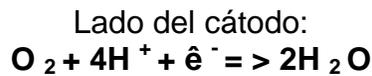
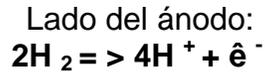


Figura 1.6 Esquema de la estructura y funcionamiento de una celda de combustible tipo PEM.

Reacciones que ocurren dentro de la celda:



La reacción en una sola celda de combustible produce solamente cerca de 0,7 volts, por lo que, para producir cantidades más elevadas de voltaje hasta un nivel razonable, muchas celdas unitarias de combustible se disponen en serie hasta formar el denominado stack.

1.3 STACK DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

La mayoría de las celdas de combustible, tipo PEM, consisten en una estructura del apilado formado por las placas colectoras de corriente, también llamadas placas bipolares o placas con campos de flujo. Una cara de una placa bipolar forma el compartimiento del ánodo de una celda unitaria y el otro lado es el compartimiento del cátodo de la celda unitaria adyacente. El voltaje total de un apilado es determinado por el número de celdas unitarias y la corriente por el área activa de cada una de las celdas unitarias.

La eficiencia eléctrica de un stack depende mucho de la tensión a la cual cada monocelda opera. Pues los voltajes requeridos para los usos prácticos exceden por mucho el voltaje de la celda unitaria. Ya que la mayoría de los usos requieren voltajes mucho más altos que esto, (por ejemplo, los motores eléctricos comerciales funcionan normalmente entre 200 a 300 volts). Por lo que, el voltaje

requerido se obtiene, construyendo un apilado y conectado en serie las celdas de combustible individuales e integradas mecánicamente (*ver figura 1.7*).

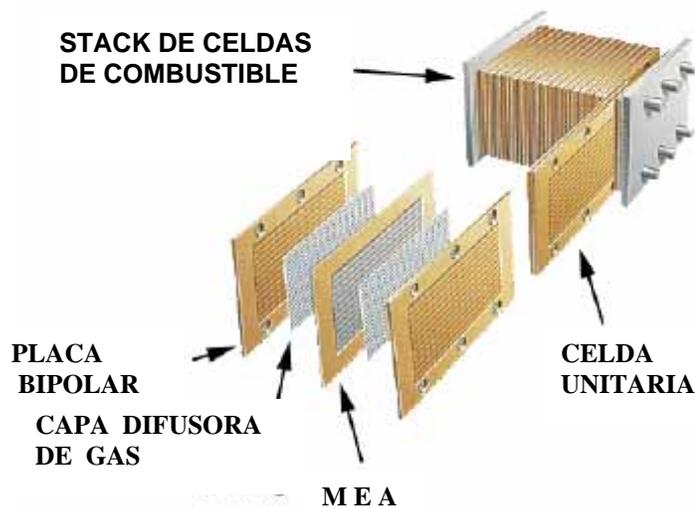


Figura 1.7 Una vista detallada de la estructura de una celda unitaria y de un apilado o stack de la PEMFC.

Un apilado con una densidad de potencia alta y la resistencia interna baja puede ser alcanzado, porque la conexión eléctrica entre las celdas unitarias se forma directamente a través las placas bipolares.

Los apilados mostrados a continuación (*ver figura 1.8*), es un prototipo de laboratorio los cuales están dispuestos en paralelo y son enfriados y alimentados por aire del cual se obtiene el oxígeno para la reacción interna. Esto es generalmente una opción óptima para un stack de celdas de combustible pequeño. Pero un apilado de alta potencia puede contener sistemas adicionales, tales como unidades para el enfriamiento, humidificación del gas y sistema conversor de electricidad, etc.

El desafío de construir apilados, incluye asegurar la distribución eficaz del reactivo a todos los electrodos y el retiro de exceso del agua de todas las partes del apilado, minimizar las diferencias de reducción del voltaje máximo y de la temperatura entre las celdas unitarias. En el orden en que se minimicen los problemas de las celdas de combustible estarán aptas para la producción en serie de stacks.



Figura 1.8 Stacks de celdas de combustible prototipos en paralelo, el ventilador forza al aire a través de los stacks para su enfriamiento y proporcionando el oxígeno para la reacción.

El área de una sola celda de combustible puede variar de algunos centímetros cuadrados a miles de centímetros cuadrados. Al igual que un apilado puede consistir de algunas cuantas celdas a cientos de monocéldas conectadas en serie. El tamaño de los apilados como se dijo anteriormente depende de la cantidad de energía requerida. Para los usos que requieren cantidades grandes de energía muchos apilados se pueden conectar en serie o paralelo.

El área de la celda de combustible determina la capacidad de corriente de la celda y el número de celdas de combustible determina el voltaje. En una celda de combustible se obtienen actualmente entre 0.2 y 0.7 [Amp/cm²], con 0,60 - 0.84 Voltios, esto corresponde a 0,12 y 0.54 [W/cm²]. Por ejemplo una celda de combustible con una potencia de 1 KW requiere normalmente alrededor de 0.20 m² MEA.

En cuanto al combustible de una celda de alta tecnología necesita 1 m³ de hidrógeno puro para producir 1.8 a 1.9 Kw, de los cuales alrededor de 0.50 y 0.80 Kw (entre un 30% y un 40%), se pierden en el proceso de funcionamiento, siendo la producción media efectiva por cada m³ de hidrógeno de 1,30Kw.

1.4 APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

El desarrollo rápido durante la última década, ha traído a la PEMFC perceptiblemente más cercana a la realidad comercial. Este tipo de la celda de combustible ha recibido gran atención, la cual aumento especialmente debido a la necesidad de la industria automotriz de encontrar un reemplazo para el motor de combustión interna. Los prototipos de los vehículos eléctricos con celda de combustible han sido introducidos ya por varias compañías.

Otros usos prometedores también están emergiendo. Las PEMFCs satisfacen bien los usos donde se requiere una respuesta rápida a los cambios de carga, esta ventaja se suma a la baja temperatura de funcionamiento y a la densidad de energía alta que entregan este tipo de celdas. La baja temperatura de operación permite, por ejemplo, la operación intermitente sin pérdidas de energía significativas, mientras que las densidades de energía altas, permite arranques instantáneos.

Las PEMFCs están siendo consideradas para la generación de energía inmediata en carga máxima y otros propósitos, como la producción de energía distribuida. Los usos residenciales también han recibido una mayor atención en los años recientes, así como, las centrales eléctricas prototipo que funcionan con hidrógeno obtenido del gas natural reformado están siendo puestas a prueba.

Las PEMFCs se podrían también utilizar como fuentes de energía en los dispositivos eléctricos portátiles, que actualmente son accionados por las baterías primarias o recargables. Las desventajas principales de las baterías son sus capacidades limitadas de energía, como se explico con anterioridad y el tiempo prolongado para recargarlas. Almacenar energía, por ejemplo, en la forma de hidrógeno en hidruros del metálicos y convertir el hidrogeno almacenado en electricidad en una celda de combustible podría permitir capacidades de energía más altas con respecto a tamaño y peso.

1.5 PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LA LITERATURA

Los siguientes problemas fueron identificados en el diseño de stacks de celdas de combustible: la pérdida de la presión del gas debido a los múltiples estrechos del gas, los débiles pernos de la sujeción, el escape del gas, la deformación de los empaques cuando se esta sujetando el stack, la alta resistencia del contacto debido a las placas bipolares de acero inoxidable y los problemas con la iniciación de la oxidación y la dirección del agua en el lado del cátodo debido a la rugosidad de los canales de flujo. El múltiple del gas y los pernos de la sujeción fueron identificados para examinar la estructura del apilado.

Los problemas con los escapes del gas, deformación de la junta y alta resistencia del contacto fueron observados experimentalmente ensamblando el stack y realizando pruebas en la operación. Estos resultados coinciden con las experiencias de Mennola et al [1999].

El problema con la iniciación de la oxidación y la dirección del agua en el lado del cátodo debido a la separación amplia de los canales de flujo, se sabe que si las separaciones son demasiado amplias, la difusión del oxidante a las piezas del electrodo debajo de estas separaciones se obstruye parcialmente y el retiro del agua es insuficiente. De acuerdo con el trabajo de Watkins et al [1991], la separación optima de los canales y los anchos de los canales del gas son de 0.89 a 1.4 mm y a partir 1.14 a 1.4 mm, respectivamente, y la profundidad óptima para los canales del gas es entre 1.02 y 2.04 mm.

1.5.1 BAJA PRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES DEL GAS

La presión a lo largo de los múltiples del gas es baja por la distribución irregular del flujo del gas en el stack. La distribución desigual del flujo causa un bajo rendimiento del reactivo en las celdas unitarias y en consecuencia la disminución del desempeño del stack. La pérdida de la presión en el múltiple del gas es típicamente un problema solamente en el lado del gas oxidante, pues la resistencia del flujo del hidrógeno es muy baja y por lo tanto las pérdidas de la

presión del hidrógeno son generalmente insignificantes. Para distribuir los gases uniformemente a todas las celdas del stack, la pérdida de la presión en un múltiple del gas debe ser menos de un décimo de la pérdida de la presión en una celda individual. Büchi et al. [1996]

1.5.2 LOS PERNOS DE SUJECCIÓN

A la vez que la resistencia de la membrana es la contribución más significativa a la resistencia de la celda, allí son también otros factores que contribuyen. Uno de ellos es la resistencia de contacto entre la placa bipolar y la capa de la difusión del gas. La resistencia del contacto es una función de la presión de contacto entre las superficies. Con una presión más grande se puede bajar la resistencia de contacto. La presión de contacto entre la capa de la difusión de gas y la placa bipolar es difícil de medir directamente. Una medida más útil es el esfuerzo de torsión en los pernos que sujetan el apilado de celdas unitarias o el stack. La presión de compresión es probablemente una función no lineal del esfuerzo de torsión del perno. A pesar de la carencia de linealidades, el esfuerzo de torsión del perno sigue siendo una magnitud útil, debido a la facilidad de la medición.

1.5.3 PROBLEMAS DE SELLADO

Fuga del gas.- Las fugas del gas conducen a la mala reacción y a un pobre desempeño del stack. La densidad del gas puede ser mejorada aumentando la compresión del stack y encontrando una junta de mejor material. Mientras que el incremento del esfuerzo de torsión del perno, fija los límites para el funcionamiento del stack, la compresión de la capa de la difusión del gas también es una limitante ya que obstruye la difusión del reactivo. Los materiales utilizados para sellar son: el caucho EPDM (Etileno-Propileno-Dieno), la junta de caucho EPDM con una junta de PTFE (politetrafluroetileno) revestido con hilo de la fibra de vidrio, unido a la MEA en un lado. Todos los materiales son relativamente baratos y fáciles de conformar. Considerando la densidad del gas, el EPDM es el

mejor material, pero desafortunadamente los gruesos de este material no son fácilmente disponibles en espesores finos. La combinación de las juntas de EPDM y de PTFE puede solucionar el problema del grueso, puesto que PTFE esta disponible en gruesos convenientes. Sin embargo con la junta de PTFE es más difícil de mantener al gas confinado que con el EPDM. El PTFE-revestido con hilo de la fibra de vidrio es el más manejable y disponible en varios gruesos convenientes para hacer los empaques, pero requiere más compresión para mantener al gas bajo presión. La densidad del gas puede ser mejorada uniendo la MEA con las juntas con un pegamento fino. La primera tentativa fue utilizando una membrana de acrílico delgado unida con pegamento. La densidad alcanzada del gas era satisfactoria, pero la aplicación del pegamento era difícil, porque el pegamento sale fácilmente de la superficie lisa de PTFE. En lugar de adquirir PTFE con la superficie grabada al agua fuerte, PTFE-revestido con hilos de la fibra de vidrio con adhesivo preparado en un lado fue utilizado.

El MEA unido a una junta revestida con adhesivo puede ser también utilizada como empaque. La membrana de Nafión™ se pega bien al adhesivo, el paquete de juntas y del MEA es muy manejable, debido al material rígido de la junta. Por lo tanto todavía permanece la cuestión de la compatibilidad química del pegamento y el empaque.

La deformación del empaque.- Los materiales suaves del empaque se deforman bajo compresión y cierra los canales del flujo cerca de los múltiples del gas y obstruyen el flujo del gas. Eso puede ser prevenido usando un material rígido para el empaque o cubriendo los canales del flujo con fragmentos de puente.

El único material suficientemente rígido para los empaques probados y mencionados anteriormente es PTFE-revestido con hilos de fibra de vidrio. Así como la combinación de EPDM y PTFE.

El tramo del puente puede ser encajado en un surco 0.5 mm de profundidad maquinando una muesca en la superficie de la placa bipolar. Los dibujos de los fragmentos de puente son presentados a continuación (*ver figura 1.9*).

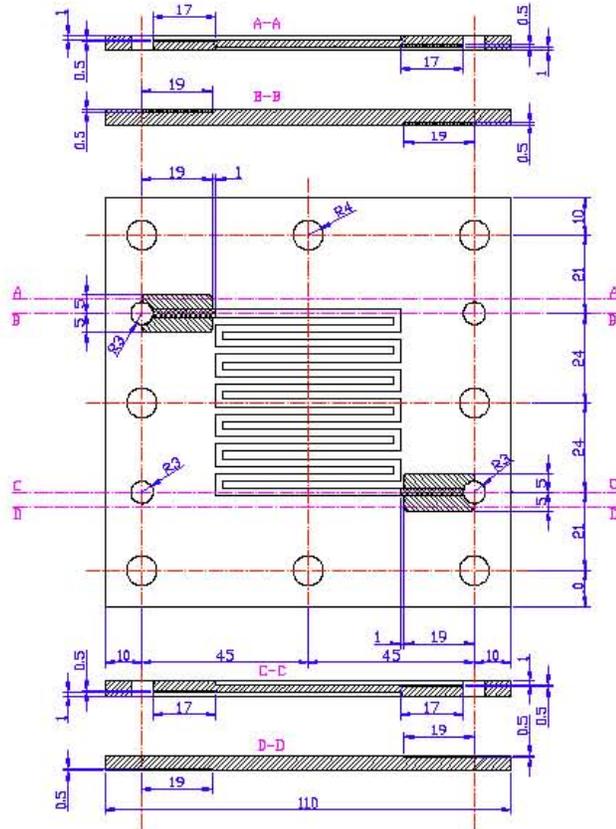


Figura 1.9 Puentes de la placa bipolar(dimensiones en mm).

El efecto de la resistencia de contacto.- La caída de voltaje en una celda de combustible debido a la resistencia ohmica se llama iR o perdida ohmica. En condiciones normales de operación, la causa más significativa de la perdida ohmica es la membrana. En algunas condiciones, sin embargo, las resistencias de contacto pueden crecer significativamente e incluso exceder la contribución de la membrana. La compresión baja, las juntas gruesas y la placa bipolar o la oxidación de la superficie de contacto de la placa colectora pueden conducir a las resistencias de contacto elevadas. El efecto de la compresión del grueso del empaque es discutido por Mikkola et al [2000].

Los materiales más comunes para las placas bipolares son grafito y acero inoxidable. Mientras que la oxidación superficial no es un problema con las placas bipolares de grafito, una capa de oxido de conductividad muy pobre se forma rápidamente en superficies del acero inoxidable. Una presión alta de contacto disminuye la resistencia por contacto, pero también obstruye la difusión del gas

comprimiendo las capas de la difusión del gas. Una forma para bajar la resistencia de contacto de una placa bipolar de acero inoxidable es cubrirla con otro material de una conductividad más alta. Varios autores están investigando actualmente los materiales de capa convenientes y los métodos, por ejemplo Bronoel et al. [1998], Fukui et al. [1998] o Yoshimura et al. [1999].

1.6 GEOMETRÍA DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Mientras que la estructura básica de las celdas de combustible sigue siendo siempre idéntica, la geometría de una celda puede ser absolutamente diferente. La geometría comúnmente usada para una celda de combustible es la planar. En una celda planar, el ánodo, el electrodo (membrana) y el cátodo se juntan en una estructura ensamblada.

El apilado o stack planar de la celda de combustible es eléctricamente una conexión en serie de cierto número de celdas de combustible. Por lo tanto es bastante fácil cubrir casi cualquier requisito del voltaje en la salida, puesto que en una conexión en serie el voltaje unicelular se puede aumentar. Por ejemplo, si se necesita un voltaje del circuito abierto de 17V (traduce a un voltaje nominal de 12V, puesto que el punto máximo de potencia de una celda está alrededor de 0.7V), 17 celdas necesitan ser conectadas en serie para formar un apilado con el voltaje de salida deseado. En teoría los apilados planares podrían consistir en cientos de celdas, pero en usos prácticos se tiene que tomar en cuenta algunos inconvenientes causados por la conducción térmica (retiro del calor), el flujo del gas (hidrógeno y oxígeno) y la conducción del agua.

Una segunda posibilidad para combinar múltiples celdas planares son las celdas en un solo nivel. Aquí las celdas no se llenan juntas, sino se combinan en un solo nivel. Se utiliza esta geometría cuando las geometrías muy planas son necesarias (por ejemplo una celda de combustible que se integre en la pantalla de la computadora portátil).

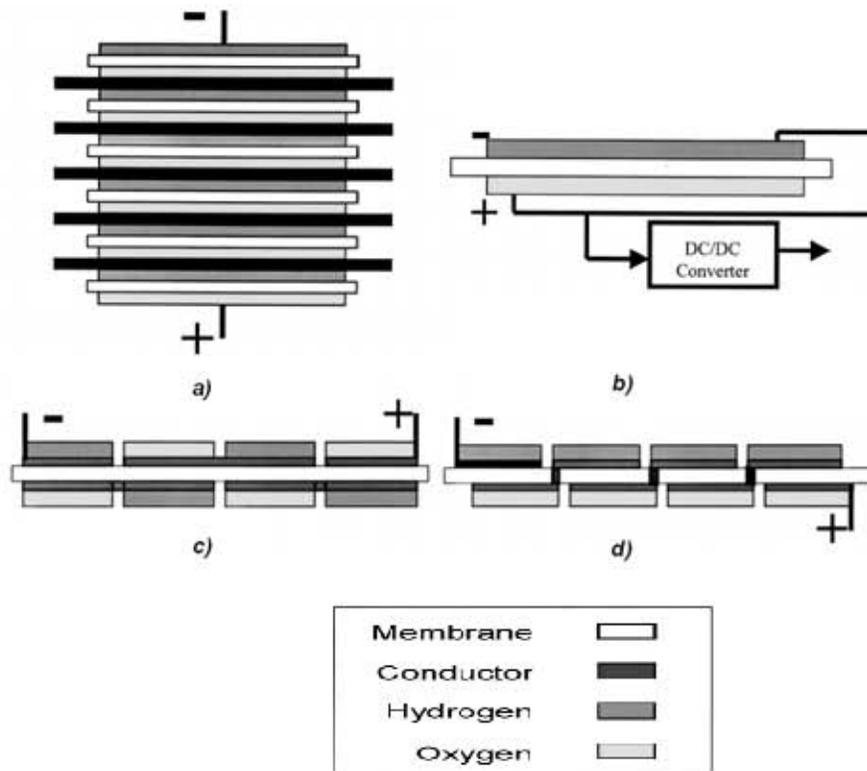


Figura 1.10 Diseños del apilado para las celdas de combustible de membrana polimérica:
 (a) Apilado vertical convencional (bipolar), (b) Celda con la conversión de dc/dc,
 (c) Configuración planar del flip-flop, (d) Configuración agrupada planar.

1.7 SISTEMAS AUXILIARES DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

Como es de esperar, un stack completo de celdas de combustible para producir electricidad, además de las celdas de combustible básicas, deben tener otros sistemas para su correcto funcionamiento. El diseño y construcción de dichos componentes se basa en los requerimientos de las condiciones de operación de la celda de combustible.

Un diagrama de bloques simplificado muestra los sistemas que complementarían a un stack de celdas de combustible:

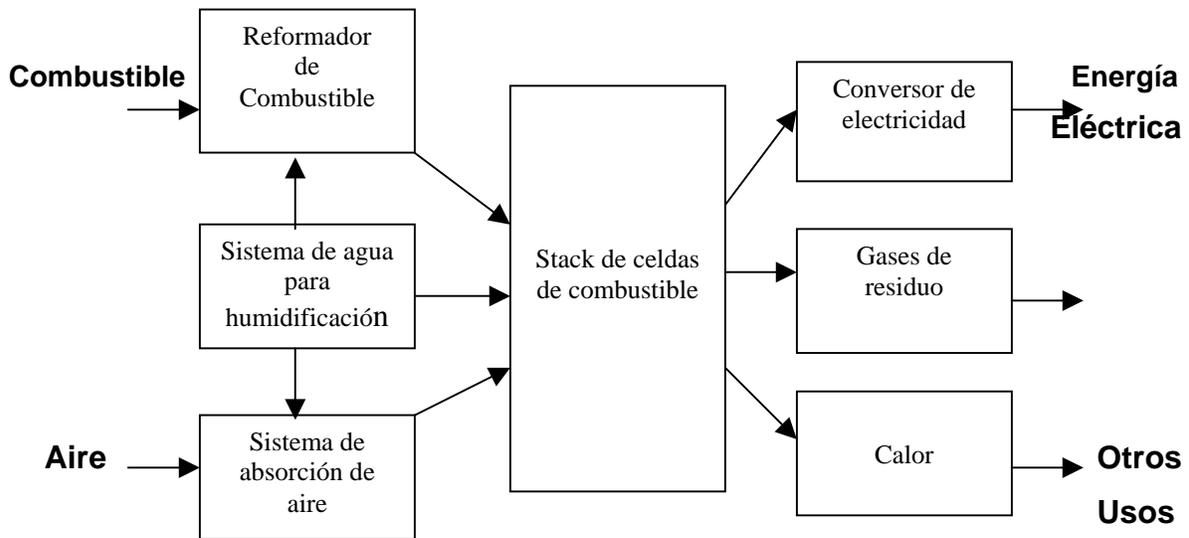


Figura 1.11 Esquema de sistemas auxiliares del stack

A.- Sistema reformador de combustible.

En el caso más sencillo, en que se usa metanol como combustible a baja temperatura, el combustible se inyecta con una bomba, sin previo tratamiento, ya que comercialmente se encuentra bastante puro. En el caso de hidrógeno puro, como en el caso de algunos vehículos, se adquiere en cilindros a muy alta presión y baja temperatura, debiendo mantenerse así en operación. En el caso de combustible derivado del petróleo, se deberá someter a un proceso de desulfurización, a menos de una parte por millón, así como eliminar el CO, que según el caso, pueden ser perjudiciales para el catalizador.

Un reformador de combustible es un equipo capaz de reformar combustibles fósiles o alcoholes en gas sintético formado principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono su objetivo es el suministro de hidrógeno a la PEMFC. (Prácticamente todas las celdas de combustible utilizan como combustible base, el hidrógeno).

B.- Sistema de agua para humidificación.

Como observamos con anterioridad en las reacciones químicas, un producto de la combustión en las celdas de combustible es siempre agua. Esta puede ser utilizada para humedecer el combustible que se inyecta a la celda, así como el aire con el oxígeno de combustión, según lo requiera el sistema

empleado, pero habrá que condensarla de los gases de escape, y almacenarla para los usos de la propia máquina. En los casos en que se produce más agua de la que requiere todo el sistema, esta agua, simplemente se descarga a la atmósfera.

El sistema humidificación y limpieza de aire, se utiliza para suministrar aire limpio con 80% de humedad relativa y a una temperatura máxima de 70°C. La humidificación de los reactivos, especialmente del oxidante, debido al alto flujo y capacidad de contenido de agua es absolutamente crítico para las características técnicas de la PEMFC, un exceso de agua en el flujo producido por el sistema de humidificación en la PEMFC puede reducir la capacidad de potencia así como causar daños en la PEMFC. Las condiciones atmosféricas existentes durante el funcionamiento deben ser tomadas en cuenta en el diseño del sistema de humidificación con el objeto de poder cumplir con los requerimientos de la PEMFC independientemente de las condiciones atmosféricas exteriores. Un filtro de aire se instala en el sistema al objeto de obtener aire limpio. No se deben producir sensibles discrepancias de temperatura entre los reactivos y el sistema de refrigeración del agua de la PEMFC con el objeto de evitar que una temperatura alta de los reactivos de cómo resultado una absorción de agua de las membranas.

El separador de Aire-Agua, se utiliza para mantener el nivel de agua desionizada en el tanque, a través de la recuperación mediante un sistema separador de aire-agua en el flujo de escape de la PEMFC.

C.- Sistema de aire.

Por lo expuesto con anterioridad, en los sistemas comerciales actuales se usa aire para obtener el oxígeno necesario para la combustión. Este se obtiene inyectándolo a la máquina con la ayuda de un compresor, previo filtrado, según sea la presión necesaria en el diseño. Pero hay que recordar que las máquinas actuales para comprimir el aire son muy ineficientes, principalmente a baja carga y baja presión, por lo que se requiere mucha atención en este sistema.

El sistema de suministro de aire se utiliza para obtener presiones de alrededor de 10 -20 psi, el cual necesita alrededor del 20- 25% de la potencia suministrada por la PEMFC para su funcionamiento.

D.- Sistema conversor de electricidad.

Debemos recordar que la energía eléctrica que se produce en una celda de combustible está en la forma de corriente directa, y que además la tensión generada varía con la carga, con lo que el sistema puede ser complicado.

Afortunadamente en la actualidad, con los sistemas de procesadores digitales, y con los convertidores de corriente directa a corriente alterna, este problema puede ser solucionado.

En los sistemas actuales, solamente se tienen algunos problemas con las variaciones bruscas de carga, en que los sistemas mecánicos del sistema no operan con la velocidad de respuesta como sería deseable. Sin embargo, los sistemas en servicio están instalados en edificios de departamentos, edificios comerciales, hospitales, bancos, y otras cargas similares, en que no se presentan variaciones súbitas en la carga de magnitud relativamente grande comparadas con la capacidad del sistema, por lo que han dado un servicio bastante satisfactorio.

E.- Sistema para el calor producido.

De acuerdo a la tabla 1, las celdas de combustible producen más o menos calor, según el tipo de celda usada. Parte de este calor se usa para activar la reacción química, y parte sale de las celdas a la atmósfera, como en el caso de los automóviles, o bien para ser utilizado en otros procesos para elevar la eficiencia térmica del sistema.

En el caso de celdas estacionarias relativamente grandes, del orden de 1000 a 3000 KW, el calor se usa para producir vapor y probablemente utilizarlo en mover turbinas, o bien como calefacción.

También se puede utilizar en combinación con turbinas de gas y de vapor, dando una planta de ciclo combinado, con eficiencias que pudieran llegar a más del 80 %.

El sistema de refrigeración de la PEMFC, necesita ser efectivo para lograr una distribución uniforme de refrigeración en los elementos de la PEMFC, el sistema elimina el exceso de calor de la PEMFC (alrededor del 100% de la

energía contenida en el escape), a través de un circuito de agua acoplado a un intercambiador de calor.

F.- Sistema de control electrónico.

Normalmente es preferible utilizar sensores y actuadores electrónicos en lugar de mecánicos, debido a sus mejores prestaciones técnicas, alto grado de fiabilidad y rápida información y actuación. El reformador, como en la mayor parte de procesos químicos, requiere una gran cantidad de sensores y actuadores con el objeto de controlar un gran número de variables de funcionamiento de acuerdo a la demanda de potencia de la PEMFC. Lo mismo ocurre con la PEMFC y los sistemas de aire, humidificación, presión, etc. Normalmente se instalan varios controladores electrónicos para cada uno de los principales sistemas, comunicados entre sí con el objeto de lograr un funcionamiento coordinado de todos los componentes.

G.- Inversor de corriente DC/AC.

La celda de combustible genera una corriente continua en su salida. Esta corriente continua circula por el acondicionador de energía, denominado inversor de corriente, el cual transforma la corriente continua en corriente alterna, a valores de tensión y frecuencia requeridos para nuestras aplicaciones. Este acondicionador incluye también un conjunto de baterías, que permiten estabilizar el suministro de energía ante variaciones instantáneas de carga.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS FUNCIONAL

Este capítulo se direcciona a un número esencial de situaciones en el desarrollo y caracterización experimental de un stack de celdas de combustible tipo PEM. Se brindara énfasis a las cuestiones básicas que se necesitan para regular las dimensiones y aplicaciones del diseño junto con su posible fabricación.

En primer lugar se procederá a delimitar los subsistemas estructurales que se someterán al diseño y que son necesarios para el buen funcionamiento del stack, en segundo lugar a cada subsistema se le realizara un análisis funcional y, por último, se ponderara para seleccionar la solución más adecuada para cada uno de dichos elementos.

2.1 ANÁLISIS FUNCIONAL DE UN STACK

El **análisis funcional** es un método utilizado para identificar la función principal que debe de realizar un subsistema, descomponiendo y analizando las funciones que realizan cada uno de los componentes del sistema y su relación entre sí, las cuales permiten llevar a término la función principal del sistema. En la redacción del propósito o función principal de un subsistema, se siguen ciertas reglas encaminadas a homogeneizar los criterios, evitando ambigüedades. Por lo que, para la redacción de la función clave o principal, se elabora sujetándose a la estructura gramatical siguiente (ver figura 2.1).



Figura 2.1 Estructura gramatical para la definición de la función principal de un sistema, objeto o función productiva.

Respetando la estructura gramatical anterior es posible realizar la redacción de la función principal de un stack de celdas de combustible, que se puede describir de la siguiente manera:

“PROPORCIONAR ENERGÍA ELÉCTRICA ÚTIL”

Un enfoque visual permitirá una mejor comprensión del análisis funcional la cual consiste en considerar al sistema como una caja negra, encargada de transformar un estado inicial en un estado final.

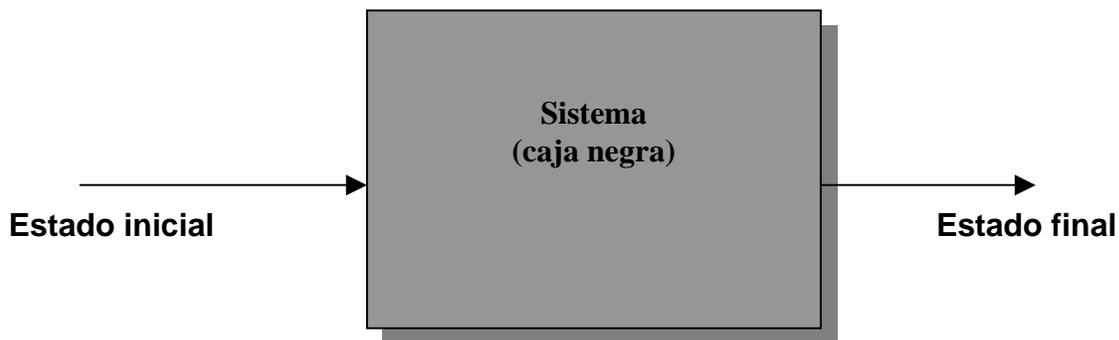


Figura 2.2 Enfoque visual del análisis funcional.

En nuestro caso, nuestra caja negra es conformada por el stack de celdas de combustible, la cual cuenta con diferentes subsistemas relacionados entre sí, que permiten que el funcionamiento del stack de celdas de combustible, lleve a cabo su propósito principal. De los diferentes subsistemas con que cuenta el stack, esta tesis, solo se enfocará al estudio de los sistemas estructurales siguientes:

- sellado
- sujeción
- refrigeración
- conexiones eléctricas

Que si bien no son los únicos subsistemas de los que se conforma el stack de celdas de combustible, si es necesario que cada uno de los subsistemas anteriores, lleve a cabo de manera optima su función, para el correcto desempeño del stack.

El enfoque visual del análisis funcional para el stack se presenta a continuación, en el cual se incluyen los subsistemas que se analizarán en el desarrollo de este trabajo.



Figura 2.3 Enfoque visual del análisis funcional del stack enfocado solo a los subsistemas que se someterán a estudio en este capítulo.

Con el anterior modelo de caja negra se delimita más claramente el problema y la importancia de los cuatro subsistemas para la conversión de energía química de reacción en energía eléctrica útil.

Cada uno de estos subsistemas realiza una serie de funciones que se pueden dividir en funciones principales o fundamentales, funciones secundarias o auxiliares y funciones innecesarias y/o perjudiciales por lo que para poder diferenciar unas de las otras, se procederá a la realización del análisis funcional de cada uno de los subsistemas antes mencionados, para lo cual se requiere tener un conocimiento lo más profundo posible del sistema en general y de cada subsistema, para evitar las ambigüedades que nos lleven a un análisis funcional erróneo lo que podría traer como consecuencia el no identificar las funciones perjudiciales y por consiguiente el no atacarlas para su eliminación o la reducción de su efecto en la medida de lo posible.

2.2 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL SISTEMA DE SELLADO

Una junta o un sello se utiliza para prevenir la salida de líquidos y gases o para mantener la presión en un recinto cerrado. Específicamente, una junta se utiliza entre dos superficies estáticas para proporcionar un sello.

Para la construcción de una celda de combustible se necesita de una manufactura un poco delicada, pues para obtener su máximo rendimiento debemos tomar en consideración los parámetros mencionados al principio de este capítulo y uno de ellos es, el sellado entre cada celda unitaria que conforman el denominado stack de celdas de combustible.

Para la realización del análisis funcional del sistema de sellado, debemos de redactar la función principal, obedeciendo la estructura gramatical mostrada con anterioridad (*ver figura 2.1*).

“EVITAR LA FUGA DE REACTIVOS”

Una vez que se ha definido la función principal o fundamental del sistema de sellado, se procede a la identificación de las funciones secundarias o auxiliares.

- 1.- Prevenir accidentes.
- 2.- Evitar pérdida de energía por fugas de reactivos.
- 3.- Evitar aumento de costos por fugas de gases reactivos.
- 4.- Evitar pérdida de presión en reactivos.
- 5.- Impedir el contacto directo de los gases reactivos dentro y fuera del stack de celdas de combustible.
- 6.- Aislar eléctricamente las placas bipolares.
- 7.- Aportar un cierre hermético entre placas bipolares.

Por último, se procederá a identificar las funciones innecesarias y/o perjudiciales para el sistema en particular y para el sistema en general.

- 1.- Bloquear canales de flujo.

- 2.- Elevar resistencia de contacto entre electrodos y placas bipolares.
- 3.- Aumentar compresión de los empaques

En el caso del sellado podemos hacerlo mediante sellos mecánicos como: los O-ring, los empaques de cartón o por medio de algunas resinas que no reaccionen con los gases reactantes (oxígeno e hidrógeno) que se introducen dentro de la celda.

El sellado es una importante función para todo tipo de celda y en especial la celda de combustible tipo PEM. Algunos desarrollos de las áreas del sellado, hoy en día incluyen:

- Sellos de alta temperatura
 - Usos de SOFC y de MCFC
 - Componentes en el procesamiento del combustible
- Sellos de buen funcionamiento contra:
 - Oscilaciones de la carga
 - Gradientes de temperatura
 - Transeúntes rápidos (presión, temperatura)
 - Ciclos múltiples
- Sellos resistentes a la corrosión
- Sellos herméticos
- Sellos de estado sólido
- Sellos de cristal

Los requerimientos para los sellos son:

- Resistencia al ciclado térmico / equiparación de coeficientes de expansión térmica con los componentes de la celda
- Estabilidad a condiciones oxidantes y reductoras
- No tener efectos negativos en el desarrollo de la celda
- Costos aceptables

Las opciones para los sellos son:

Sellos rígidos (vidrio-cerámico)

- Requieren equiparación del CTE(*coeficiente térmico equivalente*)
- Permiten diseños de celda compactos

Sellos comprensivos

- Permiten relajar el ajuste del CTE
- Requieren una carga externa al marco estructural
- Son de diseño voluminoso

A continuación se presenta la ponderación de parámetros y la matriz de decisión que se utilizó para seleccionar los materiales mas adecuados para el sellado.

Las cifras asignadas son 1 y 0, que corresponderán a si el primer parámetro tiene más o menos importancia que el segundo y así sucesivamente.

TABLA 2.1 PONDERACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL SELLADO

PARÁMETRO	1																	SUMA	PORCENTAJE %										
1 COMERCIAL	0	0	0	0	0	0	1	2													1	5.00							
2 BUEN SELLADO	1							1	1	1	0	1	3										5	25.00					
3 QUE NO REACCIONE		1						0								1	1	0	0	4							3	15.00	
4 FÁCIL FABRICACIÓN			1					0								0				0	0	0	5					1	5.00
5 RESISTENCIA MECÁNICA				1						0						0			1				0	1	6	3	15.00		
6 SEGURIDAD					1						1							1			1		1		1	6	30.00		
7 COSTO						0						0						0				1		0	0	1	5.00		
																	20	100.00											

TABLA 2.2 MATRIZ DE DECISIÓN PARA EL SELLADO

MODELO	comercial 5.00%	buen sellado 25.00%	que no reaccione 15.00%	fácil aplicación 5.00%	seguridad 30.00%	resistencia mecánica 15.00%	costo 5.00%	TOTAL
hule	1 5.00%	0.8 20.00%	1 15.00%	1 5.00%	1 30.00%	0.9 13.50%	1 5.00%	93.50%
teflón	0.8 4.00%	1 25.00%	1 15.00%	0.5 2.50%	0.5 15.00%	0.8 12.00%	0.5 2.50%	76.00%
O-ring	1 5.00%	1 25.00%	1 15.00%	1 5.00%	0.6 18.00%	0.7 10.50%	0.4 2.00%	80.50%
mica	1 5.00%	0.9 22.50%	1 15.00%	1 5.00%	1 30.00%	0.8 12.00%	0.9 4.50%	94.00%
resina	1 5.00%	1 25.00%	0.5 7.500%	0.5 2.50%	1 30.00%	0.9 13.50%	0.7 3.50%	87.00%
silicón	1 5.000%	1 25.00%	1 15.000%	0.5 2.500%	1 30.00%	0.9 13.50%	0.9 4.50%	95.50%
cartón	1 5.00%	0.4 10.00%	1 15.00%	5.00%	0.5 15.00%	0.5 7.50%	0.5 2.50%	60.00%
shelac	1 5.00%	0.5 12.50%	0.8 12.00%	0.75 3.75%	0.9 27.000%	0.9 13.50%	0.8 4.00%	77.75%
teflón con o-ring	1 5.00%	1 25.00%	1 15.00%	1 5.00%	1 30.00%	0.9 13.50%	1 5.00%	98.50%
cartón con shelac	1 5.00%	1 25.00%	1 15.00%	0.9 4.50%	0.3 9.00%	0.3 4.50%	0.3 1.50%	64.50%
hule con silicón	1 5.00%	0.5 12.50%	1 15.00%	0.7 3.50%	0.9 27.00%	0.9 13.50%	0.8 4.00%	80.50%

De acuerdo a los resultados obtenidos en la ponderación de parámetros y la matriz de decisión, se opta por la utilización de teflón combinado con O-ring que fue el que obtuvo el mayor porcentaje, también uno de los materiales que se puede utilizar es el silicón que es el que le sigue en orden de porcentajes y además es muy comercial.

2.3 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

La sujeción es otro de los factores que se tiene que tomar en cuenta en la fabricación del stack, la cual también influye en el sellado y en la resistencia de contacto, ya que la presión de compresión que debe tener el stack de celdas de combustible debe ser uniforme en todas las celdas unitarias ayudándonos de esta manera a garantizar un buen sellado y en referencia a este punto a continuación se procede al análisis funcional del sistema de sujeción.

Nuevamente, haciendo uso de la estructura gramatical mostrada anteriormente (*ver figura 2.1*), redactamos la función principal del sistema de sujeción.

“PROPORCIONAR UNIÓN MECÁNICA AL STACK”

Ya identificada la función principal del sistema de sujeción, procedemos a identificar las funciones secundarias o auxiliares.

1. Distribuir uniformemente la presión sobre las superficies de contacto.
2. Minimizar resistencia de contacto entre electrodos y placas bipolares.
3. Ayudar al cierre hermético entre placas bipolares y sellos.
4. Ayudar a minimizar los costos por fugas de gases reactivos.
5. Ayudar a evitar la pérdida de presión en los reactivos.
6. Favorecer al soporte mecánico del stack de celdas de combustible.

Identificando las funciones innecesarias y/o perjudiciales del sistema de sujeción son:

1. Obstruir la difusión de gas por compresión de capas difusoras.
2. Aumentar resistencias de contacto entre electrodos y placas bipolares.
3. Bloquear paso de reactivos por inclusión de empaque en canales de flujo.
4. Averiar elementos del stack de celdas de combustible por compresión excesiva.

5. Reducir la eficiencia en el sello por aflojarse por cambios de temperatura y uso.

La sujeción del stack de celdas de combustible se puede hacer por medio de pernos roscados de alta resistencia, por medio de cierre rápido, por medio de pernos roscados con placa terminal etc. La sujeción es un parámetro muy importante en el ensamble del stack porque de ello depende también el buen sellado, el contacto ohmico o la resistencia de contacto la cual la tenemos que minimizar para que el stack de celdas de combustible tenga un buen desempeño.

Los requerimientos para el sistema de sujeción son:

- Distribución uniforme de la presión.
- Proporcionar un sellado hermético.
- Estabilidad dimensional.
- Equiparación del coeficiente de dilatación térmica con los otros componentes.
- Compatibilidad con los materiales de la celda.
- Resistencia al ciclado térmico.
- Resistencia a las exigencias mecánicas.

De acuerdo a estos requerimientos enseguida se muestra la tabla de ponderación de parámetros y la matriz de decisión para evaluar los diferentes elementos de sujeción, de las cuales obtendremos el sistema de sujeción más adecuado a nuestras necesidades, de la misma forma en que se hizo en el apartado anterior.

TABLA 2.3 PONDERACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA SUJECIÓN

PARÁMETRO	1						2						3						4						5						6						7						SUMA	PORCENTAJE %
1 COMERCIAL	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.00						
2 DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE LA PRESIÓN	0						1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	15.00							
3 CONTROL DEL TORQUE		1					0					1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	15.00									
4 FÁCIL MONTAJE			0				0					0				0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.00											
5 RESISTENCIA MECÁNICA				1					1					1				1				1		0	1	0	1	0	0	0	0	5	25.00											
6 SEGURIDAD					1					1					1				1				1	1	1			1	1	1	1	6	30.00											
7 COSTO						1					0					0				0				0	0	0	0	0	0	0	0	1	5.00											
																																20	100.00											

TABLA 2.4 MATRIZ DE DECISIÓN PARA LA SUJECIÓN

MODELO	Comercial 5.00%	Distribución uniforme de la presion15.00%	Control del torque 15.00%	Fácil montaje 5.00%	Resistencia mecánica 25.00%	Seguridad 30.00%	Costo 5.00%	TOTAL
Pernos roscados	1 5.00%	0.8 12.00%	1 15.00%	1 5.00%	1 25.00%	0.8 24.00%	1 5.00%	91.50%
Soldadura	0.8 4.00%	0.6 9.00%	0 00.00%	0.7 3.50%	1 25.00%	0.8 24.00%	1 5.00%	70.50%
Cierre rápido	0.8 4.00%	0.7 10.50%	0.8 12.00%	1 5.00%	0.8 20.00%	0.7 21.00%	0.8 4.00%	76.50%
Prensas	1 5.00%	0.6 9.00%	0.5 7.50%	1 5.00%	0.8 20.00%	0.6 18.00%	0.9 4.50%	69.00%
Pernos roscados con placa terminal	1 5.00%	1 15.00%	1 15.00%	1 5.00%	1 25.00%	0.9 27.00%	1 5.00%	97.00%
Chavetas	1 5.00%	.4 6.00%	0 0.00%	1 5.00%	0.8 20.00%	0.6 18.00%	1 5.00%	59.00%
Remaches	1 5.00%	.6 9.00%	0 0.00%	1 5.00%	0.5 12.50%	0.5 15.00%	0.5 2.50%	49.00%
Fleje	1 5.00%	0.4 6.00%	0 0.00%	7 3.50%	0.8 20.00%	0.8 24.00%	1 5.00%	63.50%
Resinas líquidas	1 5.00%	0.7 10.50%	0 0.00%	0.7 3.50%	1 20.00%	0.9 24.00%	1 5.00%	68.00%

Aunque existen muchos métodos para unir dos piezas o más, la facilidad del montaje y desmontaje proporcionada por las fijaciones roscadas las hace ideales para muchas aplicaciones.

A la selección del o los elementos del subsistema de sujeción por medio de la tabla de ponderación de parámetros y la matriz de decisión, tenemos que tomar en cuenta otros aspectos de la sujeción como lo es, si la unión de los componentes es permanente o temporal, si es temporal, hay que agregar la facilidad del montaje y desmontaje, así como la reutilización de los componentes para la sujeción, por lo anterior y de acuerdo a los resultados arrojados por las tablas anteriores las propiedades y características de las sujeciones roscadas las hace ideales para su aplicación en el stack.

Aunque el 50% del torque que se le proporciona a los pernos se ocupa para estirar el perno, el 20% se utiliza para vencer la fricción de la cuerda y otro 20 % se ocupa para vencer la fricción entre las placas y la tuerca, dando como resultado que el esfuerzo que se le proporciona a los pernos roscados solo aporta el 10% para la distribución de presión de compresión, siguen siendo la mejor opción para la sujeción del stack por el control del torque que se les puede dar.

Por lo que para obtener una presión de compresión uniforme. El apriete de los pernos se debe hacer, proporcionándole un torque uniforme a todos y apretándolos en forma gradual y cruzada.

2.4 ANÁLISIS FUNCIONAL DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Se debe tomar en cuenta que la reacción entre el oxígeno y el hidrógeno, además de producir electricidad y agua, produce calor el cual se deberá desalojar.

Por lo que la refrigeración en el stack de celdas de combustible es de vital importancia ya que la celda de combustible para su buen funcionamiento se debe mantener a una temperatura de 80 a 85 °C, para mantener la humedad necesaria que requiere la membrana de intercambio protónico para que esta realice su función. En seguida realizaremos el análisis funcional del sistema de refrigeración para determinar su función principal.

Para determinar la función principal aplicamos la estructura gramatical antes mencionada (*ver figura 2.1*), la cual queda de la siguiente manera:

“MANTENER LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO”

Identificada la función principal de sistema de refrigeración procedemos a la definición de las funciones secundarias o auxiliares:

1. Disipar el exceso de calor producido por la reacción interna.
2. Mantener temperatura por debajo del punto de ebullición del agua.
3. Evitar la deshidratación de la membrana.
4. Evitar la degradación de la membrana

Las funciones innecesarias y/o perjudiciales del sistema de refrigeración son:

- 1.- Reducir conductividad protónica de la membrana.
- 2.- Incrementar pérdida ohmica por exceso de agua.
- 3.- Inhibir la reacción química.
- 4.- Reducir eficiencia del stack de celdas de combustible.

Los cambiadores de calor son necesarios para refrigerar las celdas de combustible y mantener una temperatura de funcionamiento constante. Estos son utilizados sobre todo por las celdas del combustible de baja-temperatura (AFC, PEMFC y PAFC). El fluido típico de refrigeración es el agua. Existen algunos tipos de cambiadores de calor como:

- Gas - Gas
- Gas - Líquido
- Condensadores
- Humectadores

Los sistemas de refrigeración deben de cumplir ciertas características para que puedan ser utilizados como tales, a continuación se da una lista de las mas importantes

- No corrosiva.
- Estable químicamente.
- No inflamable y no explosivo.
- No tóxico tanto para pulmones, ojos y en general a la salud.
- Transferencia de calor satisfactoria.
- Disponibilidad, bajo costo y de fácil manejo.

La refrigeración la podemos hacer por medio de circulación de agua en el interior del stack del cual se necesita un maquinado especial en las placas bipolares y un sistema para la recirculación del agua, esta agua se puede tomar de un recipiente exterior o de la misma agua que se esta produciendo, y que es producto de la reacción del hidrógeno con el oxígeno. También se puede refrigerar por medio de aire poniendo un ventilador en el exterior, en este caso también debe tener un maquinado en las placas bipolares de una forma especial que permita la entrada de aire para desalojar el calor que se genera dentro del stack y que es producto de la reacción. Otro medio que se puede utilizar es el que se usa para los circuitos electrónicos y que es por medio de aletas las cuales se tienen

que adaptar a las placas bipolares, y así poder desalojar el calor producido en el interior de la celda, los métodos antes mencionados también se pueden combinar de dos en dos como es el caso de las aletas y el aire, o agua con aletas o agua con aire o incluir tres en el mismo sistema de enfriamiento.

En referencia a lo anterior y para seleccionar el sistema de refrigeración más adecuado se procede a la realización de la tabla de ponderación de parámetros y la matriz de decisión para elegir un sistema de refrigeración más óptimo de los mencionados anteriormente.

TABLA2.5 PONDERACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA REFRIGERACIÓN

PARÁMETROS	1					2					3					4					5					SUMA	PORCENTAJE %
1 COMERCIAL	0	0	0	0	1																					1	6.66
2 TIEMPO DE ENFRIAMIENTO	1					1	1	1	1																	5	33.33
3 CONTROL DE FLUJO		1				0					1	0	1													3	20.00
4 FÁCIL MONTAJE			1				0				0					0	0	0								1	6.66
5 EFICIENCIA				1				0				1	1	1												4	26.66
6 COSTO					0				0				0					1	0							1	6.66
																										15	100.00

TABLA 2.6 MATRIZ DE DECISIÓN PARA LA REFRIGERACIÓN

MODELO	Comercial 6.66%	Tiempo de enfriamiento 33.33%	Control de flujo 20.00%	Fácil montaje 6.66%	Eficiencia 26.66%	Costo 6.66%	TOTAL
Aire ambiente	1 6.66%	0.4 13.332%	0.2 4.00%	1 6.66%	.4 10.664%	1 6.66%	48.00%
Agua	1 6.66%	.6 25.00%	0.8 16.00%	0.4 2.66%	0.5 13.33%	1 6.66%	70.31%
Aletas	0.8 5.33%	0.5 16.66%	0.0 0.00%	0.5 3.33%	0.6 16.00%	0.7 4.66%	46.00%
Ventilador o compresor	1 6.66%	0.9 30.00%	1 20.00%	1 6.66%	0.9 24.00%	0.8 5.33%	92.65%
Maquinado de placas	0.0 0.00%	1 33.33%	0.8 16.00%	0.5 3.33%	0.9 24.00%	0.5 3.33%	80.00%
Glicol	0.7 4.66%	0.7 23.33%	0.8 16.00%	0.5 3.33%	0.7 18.66%	0.5 3.33%	69.30%
Aire y aletas	0.6 4.00%	0.8 26.66%	0.3 6.00%	0.8 5.33%	0.5 13.33%	0.6 4.00%	59.32%
Gas refrigerante	0.5 3.33%	1 33.33%	0.8 16.00%	0.4 2.66%	0.9 24.00%	0.7 4.66%	84.00%

2.5 ANÁLISIS FUNCIONAL DE LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS

Para aplicaciones prácticas las celdas unitarias se combinan en serie para producir el voltaje deseado y obtener una alta potencia en el stack de celdas de combustible para que pueda ser utilizable.

Un stack de celdas de combustible se puede configurar con muchos grupos de celdas unitarias con conexiones en serie o paralelo, para adaptar el voltaje, la corriente, y la energía requerida, ya que de acuerdo a la ley de Ohm podemos conectar en serie para obtener el máximo voltaje o en paralelo para obtener la máxima corriente, según sea el caso o necesidad.

El número de las celdas individuales contenidas dentro de un stack varía perceptiblemente con el diseño y la energía que se requiera. A continuación se realizará el análisis funcional de las conexiones eléctricas.

Nuevamente utilizando la estructura gramatical mencionada (*ver figura 2.1*), redactamos la función principal de las conexiones eléctricas.

“OBTENER EL VOLTAJE DESEADO”

Procedemos a la identificación de las funciones secundarias o auxiliares.

- 1.- Elevar potencia eléctrica.
- 2.- Combinar celdas.
- 3.- Recolectar la corriente eléctrica.
- 4.- Concentrar la corriente eléctrica hacia la carga.

Las funciones innecesarias y/o perjudiciales de las conexiones eléctricas son:

- 1.- Aumentar la resistividad.
- 2.- Provocar corto circuito.
- 3.- Colaborar a las pérdidas de corriente.

En el caso de tener placas bipolares metálicas o de grafito las conexiones se realizan por medio de estas, ya que, durante el funcionamiento de la celda la placa bipolar, como dice su nombre, se polariza haciendo la conexión eléctrica.

A continuación se muestra la tabla de ponderación y la matriz de decisión para las conexiones eléctricas para seleccionar el mejor sistema.

TABLA 2.7 PONDERACIÓN DE PARÁMETROS PARA LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS

PARÁMETROS	1					2					3					4					5					SUMA	PORCENTAJE %
1 COMERCIAL	0	0	0	0	1																					1	6.66
2 BUENA CONDUCTIVIDAD	1					1	1	0	1																	4	26.66
3 FÁCIL MANEJO		1				0					0	0	0													1	6.66
4 RESISTENCIA MECÁNICA			1				0				1			0	1											3	20.00
5 EFICIENCIA				1			1					1		1	1											5	33.33
6 COSTO				0					0				1		0	0										1	6.66
																										15	100.00

TABLA 2.8 MATRIZ DE DECISIÓN PARA LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS

MODELO	Comercial 6.66%	Buena conductividad 26.66%	Fácil manejo 6.66%	Resistencia mecánica 20.00%	Eficiencia 33.33%	Costo 6.66%	TOTAL
Cable de cobre	1 6.66%	0.8 21.33%	1 6.66%	1 20.00%	0.9 30.00%	0.9 6.00%	90.65%
Placa bipolar de grafito	0.4 2.66%	1 26.66%	1 6.66%	0.5 10.00%	0.8 30.00%	0.5 3.33%	79.31%
Malla de acero inoxidable	0.7 4.66%	0.7 18.66%	0.9 6.00%	0.9 18.00%	0.6 20.00%	0.7 4.66%	72.00%
Cable plano	0.9 6.00%	1 26.66%	0.8 5.33%	0.8 16.00%	1 33.33%	0.9 6.00%	93.32%
Cable de oro	0.5 3.33%	1 26.66%	8.0 5.33%	0.8 16.00%	1 33.33%	0.5 3.33%	88.00%

De los resultados obtenidos en la matriz de decisión se opta por hacer las conexiones eléctricas con cable plano similar al que se utiliza en las computadoras. Para hacerlo de una manera compacta y ordenada, ya que esta cinta solo se separa lo suficiente para conectar cada celda y lo demás permanece unido.

Una vez realizado el análisis funcional de cada uno de los subsistemas del stack se procede a la realización del árbol o diagrama de funciones que permitirá tener más claro las relaciones existentes entre las funciones de los diferentes subsistemas.

ÁRBOL O DIAGRAMA DE FUNCIONES

PROPÓSITO PRINCIPAL

CONVERTIR ENERGÍA QUÍMICA EN ENERGÍA ELÉCTRICA ÚTIL

FUNCIÓN PRINCIPAL

EVITAR FUGA DE REACTIVOS

PROPORCIONAR UNIÓN MECÁNICA AL STACK

FACILITAR EL INTERCAMBIO PROTÓNICO

OBTENER EL VOLTAJE DESEADO

SUBFUNCIONES

-PREVENIR ACCIDENTES
-EVITAR PERDIDA DE ENERGÍA POR FUGAS
-AISLAR ELÉCTRICAMENTE LAS PLACAS BIPOLARES
-EVITAR AUMENTO DE COSTOS POR FUGAS
-EVITAR PERDIDA DE PRESIÓN EN LOS REACTIVOS
-APORTAR UN CIERRE HERMÉTICO ENTRE PLACAS BIPOLARES

-DISTRIBUIR UNIFORMEMENTE LA PRESIÓN DE COMPRESIÓN
-MINIMIZAR RESISTENCIA DE CONTACTO ENTRE ELECTRODOS Y PLACAS BIPOLARES
-FAVORECER AL SOPORTE MECÁNICO DEL STACK

-EVITAR DESHIDRATACIÓN DE LA MEMBRANA
-DISIPAR EXCESO DE CALOR PRODUCIDO
-MANTENER TEMPERATURA POR DEBAJO DEL PUNTO DE EBULLICIÓN DEL AGUA

-ELEVAR POTENCIA ELÉCTRICA
-COMBINAR CELDAS
-RECOLECTAR CORRIENTE ELÉCTRICA
-CONCENTRAR CORRIENTE ELÉCTRICA HACIA LA CARGA

FUNCIONES PERJUDICIALES

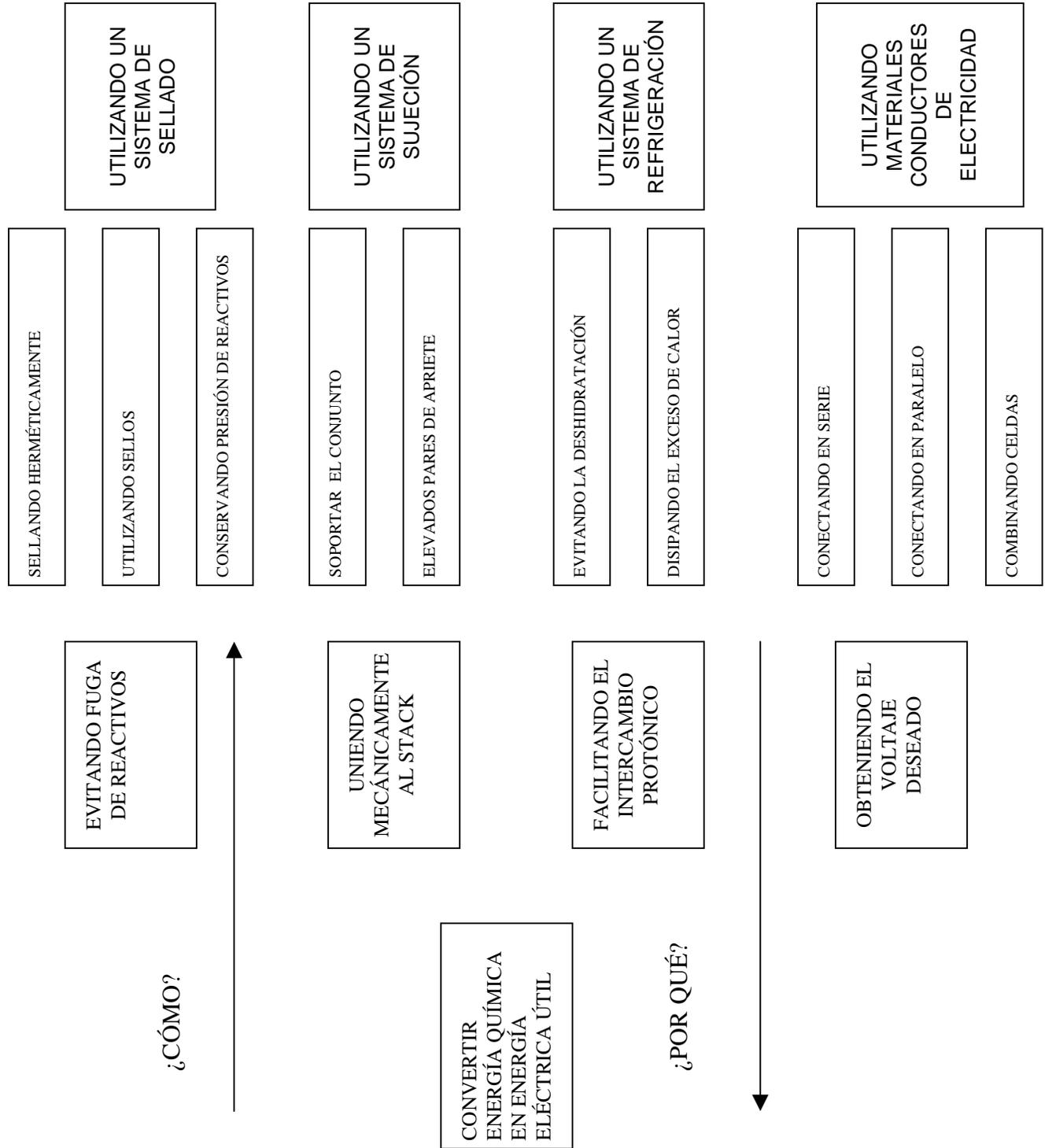
-AUMENTAR DÍMENCIONES DEL STACK
-BLOQUEAR CANALES DE FLUJO
-ELEVAR RESISTENCIA DE CONTACTO ENTRE ELECTRODO Y PLACAS BIPOLARES

-OBSTRUIR DIFUSIÓN DE GAS POR COMPRESIÓN DE CAPAS DIFUSORAS
-AUMENTAR RESISTENCIA DE CONTACTO ENTRE ELECTRODOS Y CAPAS DIFUSORAS
-BLOQUEAR PASO DE REACTIVOS POR INCLUSIÓN DE EMPAQUE EN CANALES DE FLUJO

-REDUCIR CONDUCTIVIDAD PROTÓNICA DE LA MEMBRANA
-INCREMENTAR PERDIDA OHMICA POR EXCESO DE AGUA
-INHIBIR REACCIÓN QUÍMICA
-REDUCIR EFICIENCIA DEL STACK

-AUMENTAR RESISTIVIDAD
-PROVOCAR CORTO CIRCUITO
-COLABORAR A LAS PÉRDIDAS DE CORRIENTE

DIAGRAMA FAST



En seguida, se procede a la elaboración del diagrama FAST (Function Analysis System Technique), este diagrama permite agrupar y jerarquizar las funciones, auxiliándose de las interrogantes ¿cómo? en un sentido de izquierda a derecha y ¿por qué? de derecha a izquierda.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE DETALLE

Después de realizarse el análisis funcional de cada sistema, y de someter estos sistemas a estudio por medio de tablas de ponderación de parámetros y de la matriz de decisión para la selección de los componentes de cada sistema en particular, en seguida, se presentaran las alternativas de solución para la posible construcción del stack de celdas de combustible de intercambio protónico iniciándose de este modo con el proceso de desarrollo de los componentes del stack de celdas de combustible, que se relacionan con las funciones de cada sistema sometido a estudio.

3.1 DISEÑO DE DETALLE

Tras el análisis realizado y con los resultados arrojados, por las técnicas de diseño aplicadas para la selección de los componentes del stack, se procederá a la presentación de un resumen de los componentes que conformaran cada sistema, en la cual se pueden ver la primera y la segunda opción de acuerdo a los resultados arrojados durante el proceso de evaluación por las técnicas de diseño antes mencionadas.

Es importante mencionar que la selección de los elementos y el diseño deberán favorecer para que el stack de celdas de combustible sea fabricado en forma rápida y sencilla, tanto en el ensamble como en la manufactura de las piezas que lo conforman.

Tabla 3.1 RESUMEN DE LAS SOLUCIONES PARA LOS SISTEMAS EN ESTUDIO PRESENTANDO LA PRIMERA Y LA SEGUNDA OPCIÓN

	SISTEMA			
	<i>SELLADO</i>	<i>SUJECIÓN</i>	<i>REFRIGERACIÓN</i>	<i>CONEXIONES</i>
OPCIÓN 1	Teflón con O-ring	Pernos con placa terminal	Ventilador y/o compresor	Cable plano
OPCIÓN 2	Silicón	Pernos roscados	Gas refrigerante	Cable de cobre

La etapa de diseño de detalle, es la que como su nombre lo indica, se definen las soluciones previamente exploradas en la etapa conceptual para cada sistema, en esta etapa se deciden las características como, dimensiones, materiales, acabados, tolerancias, etc. Para satisfacer las especificaciones del diseño.

3.2 DETALLE DEL SISTEMA DE SELLADO

Es importante mencionar que tras la descomposición funcional y después de haber llevado a cabo el proceso de evaluación de alternativas para el sistema de sellado, se llegó a la conclusión de que la mejor alternativa es el teflón con O-ring, como se puede observar en el resumen de soluciones (*ver tabla 3.1*), ya que es el que mejor se adecua a nuestras necesidades y la que mejor satisface

nuestros requerimientos de diseño, tanto el teflón como el O-ring serán adquiridos comercialmente, ya que durante el proceso de evaluación se buscó que estos elementos fueran comerciales para evitar su construcción o manufactura especial, lo que representaría un aumento en tiempo y costos por este concepto.

Al utilizar O-ring se requiere de una manufactura especial de las placas bipolares, ya que se tiene que hacer una ranura que servirá para alojar el O-ring como se muestra (*ver figura 3.1*), este sistema estará compuesto de piezas fabricadas (placas bipolares) y piezas adquiridas comercialmente (O-ring y teflón), tanto la ranura como el O-ring deben obedecer ciertos parámetros de diseño para que ambos cumplan con la función para la cual fueron incluidos en este particular diseño de placas bipolares, los parámetros a considerar se presentaran a continuación para hacer una correcta selección y uso de los O-rings.

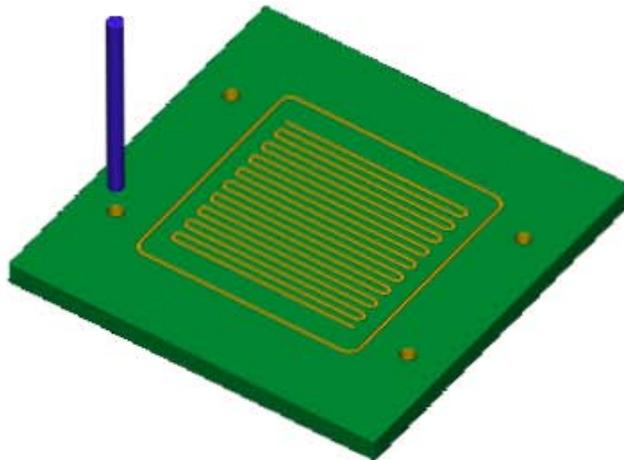


Figura 3.1 Diseño de placa bipolar para sellado con O-ring.

Los O-rings son fabricados de elastómeros compuestos tales como caucho natural o sintético y se utilizan para sellar piezas mecánicas para mantener algún fluido (gaseoso o líquido). Los O-rings realizan su función de acuerdo a sus propiedades elásticas que tienen para deformarse y oprimirse contra las paredes de la cavidad en la que son confinados y garantizar un ajuste de interferencia predeterminado. Los O-rings se insertan en las cavidades y se utilizan en dos tipos de diseños de sellado el **axial** y el **radial** (*ver figura 3.2*). Estas geometrías de la cavidad complementadas con los O-rings forman un sello, los requerimientos de

nuestro sellado son del tipo axial por lo que nos enfocaremos a los parámetros de diseño de este tipo de sellado.

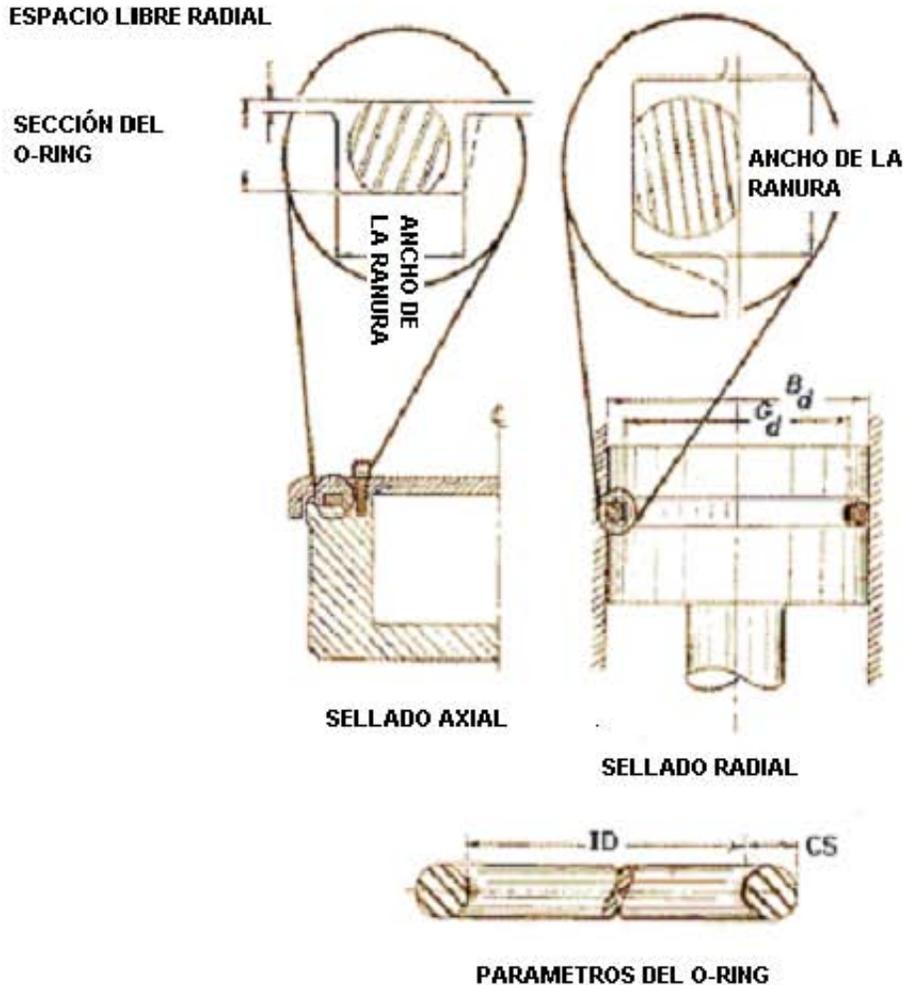


Figura 3.2 Tipos de diseño para sellado con o-rings.

Un O-ring es totalmente definido cuando se conoce su diámetro interno (ID), su diámetro de la sección transversal (CS), su material (definido típicamente por la dureza) y por su composición (ver figura 3.2).

Para que un O-ring selle y en nuestro caso, evite la fuga del hidrógeno y el oxígeno, debe ser comprimido cuando se encuentra dentro de la ranura por lo que se deben de seguir los parámetros de diseño para determinar las dimensiones apropiadas del O-ring para el sellado de las placas bipolares y en su caso los parámetros de diseño para determinar las dimensiones apropiadas de la ranura

donde se alojara el O-ring a continuación se definen los parámetros de diseño que se deben tomar en cuenta para un sello de este tipo tanto para el O-ring como para la ranura que se muestran, en las tablas 3.2 y 3.3 respectivamente.

Tabla 3.2 PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LOS O-RINGS

Símbolo	Parámetro	Descripción
ID	Diámetro Interno	Diámetro del borde interior de la ranura.
CS_{max}	Diámetro Seccionado Transversalmente Máximo	Límite superior en el diámetro seccionado transversalmente para un sistema dado de requisitos de la entrada.
CS_{min}	Diámetro Seccionado Transversalmente Mínimo	Un límite más bajo en el diámetro seccionado transversalmente para un sistema dado de requisitos de la entrada.
CS_{tol}	Tolerancia Seccionada Transversalmente	Tolerancia de la fabricación en el diámetro de la sección representativa del o-ring.
C_{max}	Compresión Máxima	Límite superior para la compresión seccionada transversalmente (en %es) cuando el o-ring se asienta en la ranura; utilizado como entrada del diseño.
C_{min}	Compresión Mínima	Un límite más bajo para la compresión seccionada transversalmente (en %es) cuando el o-ring se asienta en la ranura; utilizado como entrada del diseño.

Tabla 3.3 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LA RANURA

Símbolo	Parámetro	Descripción
B_d	Diámetro interno de la ranura	Diámetro externo de la ranura que confina el diámetro externo del o-ring.
B_{tol}	Tolerancia del diámetro interno de la ranura	Tolerancia de la fabricación en el diámetro de la ranura.
G_d	Diámetro de la ranura	Diámetro mínimo de la ranura que confina el diámetro interno del o-ring.
G_{tol}	Tolerancia del diámetro de la ranura	Tolerancia de la fabricación en el diámetro de la ranura.
Gw	Anchura de la ranura	Longitud de la ranura en la dirección axial; debe ser bastante grande para acomodar la extensión axial del o-ring.

3.2.1 PAUTAS PARA EL DISEÑO DE LOS SELLOS AXIALES

El diseño de los O-rings para los sellos axiales, es definido por las dimensiones de la ranura que alojará al O-ring tales dimensiones son su diámetro interno de la ranura (B_d) y la anchura de la ranura (G_w).

Diámetro externo de la ranura (B_d)

Para que el O-ring se aloje cómodamente en la ranura, es deseable que el O-ring se estire levemente. Por lo que la cantidad recomendable del estiramiento (S) se encuentra entre el 1% y el 5%, con el 2% como el valor óptimo del estiramiento, estos valores se muestran en la tabla 3.4.

TABLA 3.4 VALORES DE ESTIRAMIENTO DE LOS Ó-RING.

Punto de Funcionamiento	Valor del Estiramiento de O-ring	
	%	S
mínimo	1%	0,01
máximo	5%	0,05
recomendado	2%	0,02

Para el cálculo del diámetro interno (ID) de la ranura que alojara al O-ring se realiza a través de la ecuación 3.1.

$$\begin{aligned} ID &= Gd(1 - S_{rec}) \\ &= Gd(0.98) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.1} \end{aligned}$$

Al estirar el O-ring, nos aseguramos que éste no se torcerá y permanecerá en la ranura evitando que caiga durante el ensamble de las placas bipolares del stack de celdas de combustible.

Diámetro de la sección transversal (CS)

El O-ring se comprime en la dirección radial cuando está asentado en la ranura. Por lo tanto, uno puede pensar en la sección representativa del O-ring como siendo “pellizcada” entre el diámetro externo de la ranura (B_d) y el diámetro interno de la ranura (G_d).

Para que el O-ring sea comprimido cuando se encuentra alojado en la ranura, el diámetro del O-ring seccionado transversalmente (CS) debe ser mayor que la profundidad total de la ranura.

$$CS > \frac{B_d - G_d}{2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.2}$$

La diferencia entre el CS y la profundidad total de la ranura representa la compresión (C) del O-ring (valor adimensional),

$$C = 1 - \left(\frac{B_d - G_d}{2 \cdot CS} \right), C > 0 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.3}$$

Se requiere que C sea mayor de cero para que el O-ring sea comprimido. El límite superior recomendado de C depende del tipo de sello. En sellos estáticos, donde el O-ring no está en movimiento, la compresión máxima recomendada es de aproximadamente 40%. En sellos dinámicos, tales como un pistón que se mueve dentro de un cilindro, la compresión máxima recomendada es de el 30%, tal como se muestra en la tabla 3.5.

TABLA 3.5 COMPRESIÓN MÁXIMA RECOMENDADA PARA LOS O-RING

Tipo del Sello	Recomendado Compresión Máxima	
	%	C
estático	40%	0,40
dinámico	30%	0,30

Característicamente, la compresión es una entrada del diseño determinada por el ingeniero de diseño. En este caso, el CS es encontrado invirtiendo la ecuación mencionada de la compresión,

$$CS = \frac{\left(\frac{Bd - Gd}{2}\right)}{1 - C} \dots\dots\dots Ecuación 3.4$$

Para explicar tolerancias de la fabricación, una gama de los diámetros seccionados transversalmente ($CS_{\text{mínimo}}$ al $CS_{\text{máximo}}$) se puede proporcionar por las dos ecuaciones siguientes,

$$CS_{\text{max}} = \left[\frac{(Bd - Btol) - (Gd + Gtol)}{2} \right] \left(\frac{1}{1 - C_{\text{max}}} \right) - CStol \dots\dots\dots Ecuación 3.5$$

$$CS_{\text{min}} = \left[\frac{(Bd + Btol) - (Gd - Gtol)}{2} \right] \left(\frac{1}{1 - C_{\text{min}}} \right) + CStol \dots\dots\dots Ecuación 3.6$$

donde todos a cada uno de los símbolos se encuentra definidos en las tablas 3.1 y 3.2.

Ancho de la ranura (GW)

Cuando el O-ring se comprime radialmente, se amplía axialmente ya que la mayoría de los materiales elastomericos son eficazmente incompresibles. El ancho de la ranura recomendable debe ser 1.5 veces el diámetro seccionado transversalmente del O-ring.

$$GW = CS(1.5) \dots\dots\dots Ecuación 3.7$$

Una vez que se han calculado el diámetro seccionado transversalmente (CS) y el diámetro interno (ID) del O-ring se consultaran los catálogos de los fabricantes para seleccionar el que se adapte a nuestro diseño en caso contrario lo más recomendable es modificar los parámetros de la ranura.

Por último para dar por terminado el proceso de diseño del O-ring debemos especificar en base a las condiciones de trabajo (presión, temperatura) a las que será sometido el O-ring así como los productos químicos a los que será expuesto, lo anterior para seleccionar el material del cual debe ser fabricado el O-ring.

Para la selección del material que debe ser fabricado nuestro O-ring se consultaron tabla A.1 de compatibilidad química de los elastómeros que se muestra en el apéndice A, la cual nos sirve de guía para seleccionar el material adecuado para nuestro O-ring siendo el más común y los más recomendables los elastómeros perfluorados como el PTFE (politetrafluoroetileno).

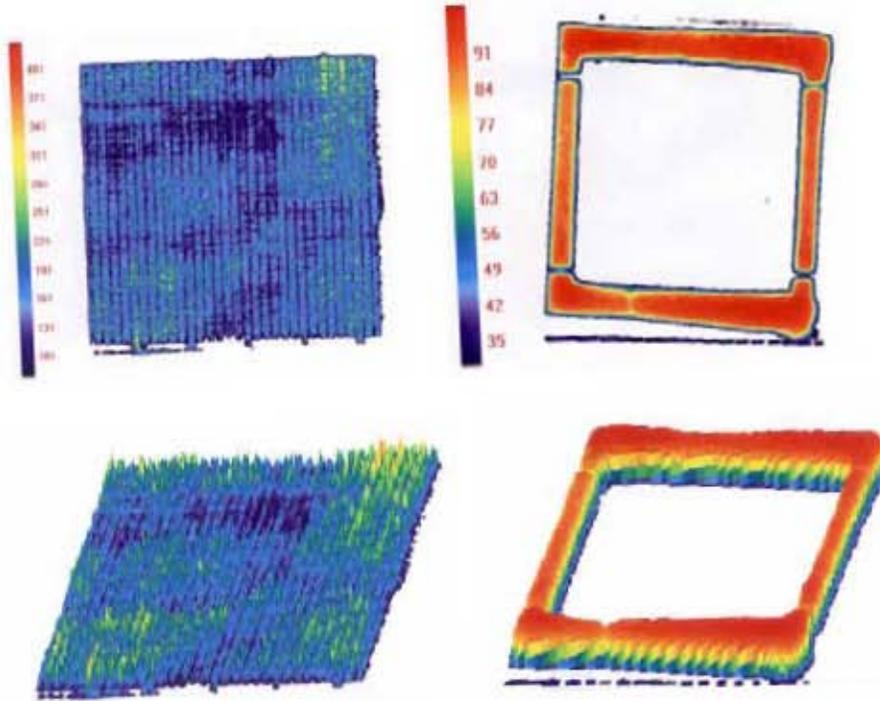
Una vez conocidos los parámetros para el cálculo y la selección de los elementos del sistema de sellado (O-ring) procederemos a la fabricación de un prototipo del stack de celdas de combustible.

3.3 DETALLE DEL SISTEMA DE SUJECIÓN

De acuerdo al proceso de evaluación realizado por medio del análisis funcional y a la ponderación de parámetros realizados para el sistema de sujeción, se llegó a la conclusión de que la mejor alternativa son los pernos roscados con placas de cierre, los cuales resultaron ser los mejores candidatos para solucionar el problema planteado, que es el de distribuir la presión uniforme en toda la superficie transversal del stack de celdas de combustible.

Para obtener una presión de compresión uniforme en toda la superficie transversal del stack nos auxiliamos de las placas de cierre, que son las que distribuirán de manera uniforme la presión que se producirá al apretar los pernos roscados, y para asegurar una distribución de la presión uniforme el apriete de los pernos roscados deberá de garantizarse que a cada perno se le proporcione un torque uniforme, mediante un apriete en forma gradual y cruzada como se menciono con anterioridad en la sección del análisis del sistema de sujeción.

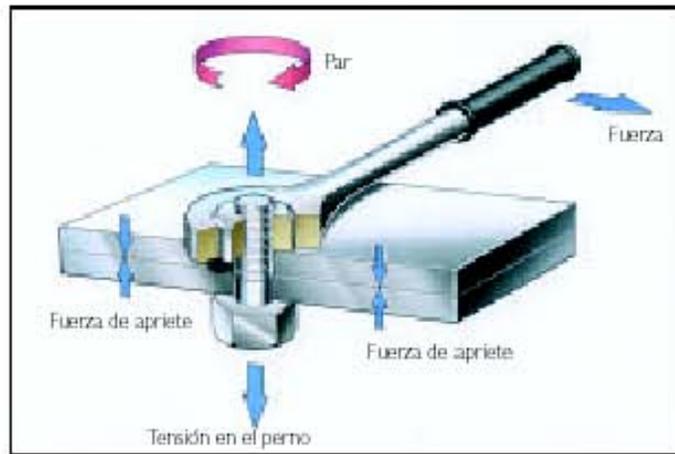
En las siguientes figuras 3.3 se muestra la distribución de presiones en un stack, en las cuales se muestra una mala distribución de la presión de compresión y en las otras una distribución de la presión de compresión homogénea respectivamente y que es lo que nosotros estamos buscando.



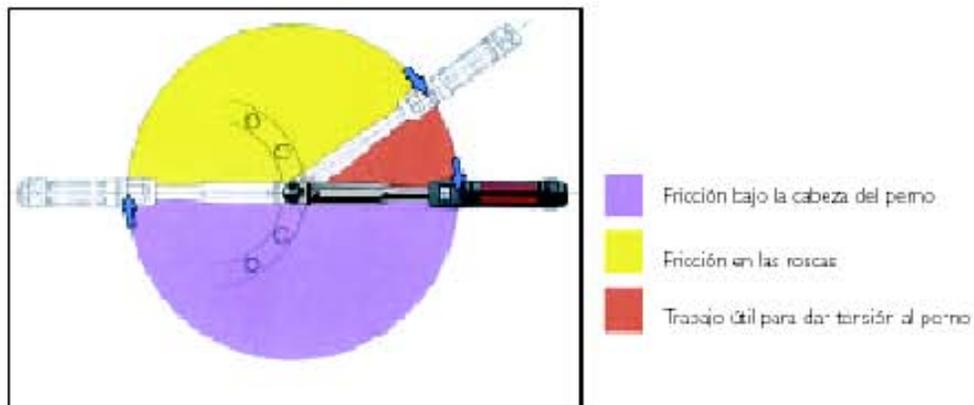
Figuras 3.3 Distribución de presiones dentro del stack.

Quando se acopla en un montaje una tuerca y un perno, la tensión inducida en el perno provoca el estiramiento de este y una fuerza equivalente actúa comprimiendo las partes unidas, de esta manera, se proporciona una compresión en las placas terminales del stack, que a su vez, transmite esta compresión a las placas bipolares de que consta el apilado tal como se muestra en la figura 3.4-a.

Como se menciona con anterioridad en toda unión mediante pernos roscados, el esfuerzo del torque que se le proporciona a estos se distribuye de la siguiente manera, el 50% se emplea en estirar el perno, un 20% se usa en vencer la fricción de la cuerda con la tuerca, otro 20% se pierde en la fricción de la tuerca y la placa de cierre y solo el 10% se aprovecha para la presión de compresión, tal como se muestra (ver figura 3.4-b).



a)



b)

Figura 3.4 esfuerzos en un perno roscado, a) Representación física de las fuerzas actuantes, b) Representación gráfica porcentual de esfuerzos en un perno

Con lo antes descrito, podemos considerar que para el armado de nuestro stack de celdas de combustible, deberemos de utilizar pernos de alta resistencia, para que puedan resistir las condiciones de trabajo a las que serán sometidos dichos pernos, ya que el torque que se le tiene que dar a los pernos roscados, oscila entre los 30-40 libras-pie cuando el stack se compone de placas bipolares de grafito y que también es la recomendada por la tabla A.2, mostrada en el apéndice A. Para los pernos roscados de 3/8" que son los que se están utilizando, esta sujeción la podemos ver en la figura 3.5, solo que en nuestro caso se pondrán 8 tornillos en vez de cuatro, para una mejor transmisión y distribución de la presión de la placas de cierre hacia las placas bipolares del stack.

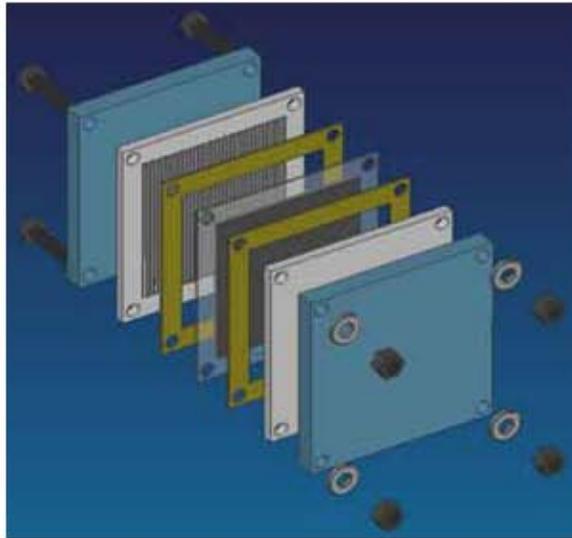


Figura 3.5 Sujeción del stack por medio de pernos y placas de cierre.

Para poder tener un torque uniforme, nos auxiliaremos de un torquímetro, un instrumento muy útil para darle el apriete uniforme a los pernos roscados. En la figura 3.6 se muestra un torquímetro, que permite aplicar un torque uniforme a los pernos roscados, además de que se puede tener un dato que se pueda registrar y hacer comparaciones.

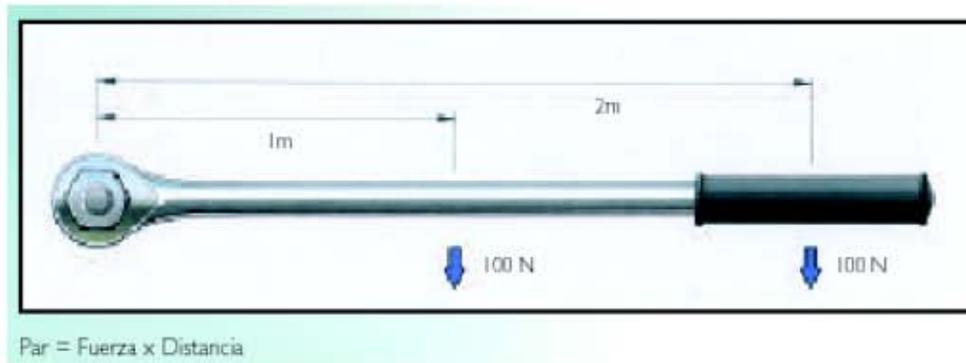


Figura 3.6 torquímetro.

Aclarando, si un elemento está diseñado para quedar instalado en un agujero roscado se denomina tornillo y se aprieta aplicando par a la cabeza de este. Si está diseñado para instalarse con tuerca se denomina perno roscado, y se aprietan con par de torsión a la tuerca como se observa en la figura 3.7

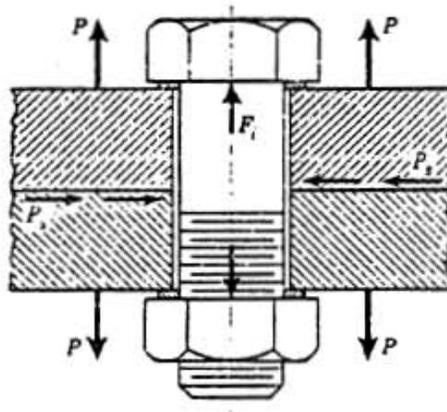


Figura 3.7 Perno roscado.

TERMINOLOGÍA, CLASIFICACIÓN Y DENOMINACIÓN DE LAS ROSCAS

Se puede observar en la figura 3.8 los parámetros más importantes para definir y especificar una rosca de un perno roscado.

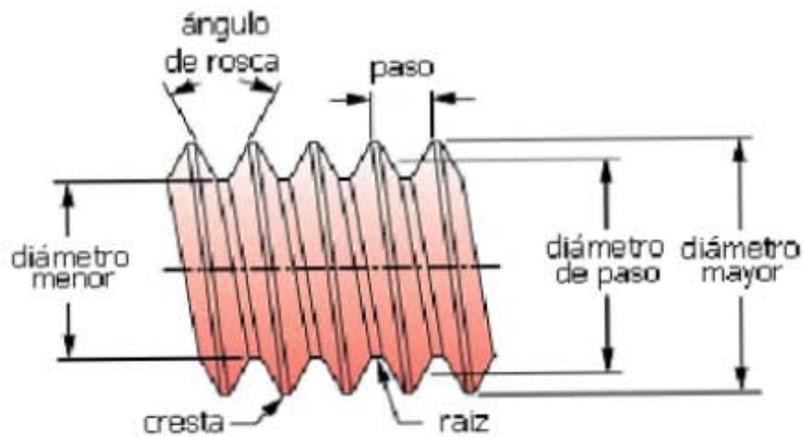


Figura 3.8: Parámetros de una rosca.

Los parámetros empleados para definir una rosca de un perno se caracteriza por los siguientes parámetros:

- 1) PASO
- 2) FORMA DEL FILETE
- 3) ANGULO DE LA ROSCA
- 4) AVANCE
- 5) SENTIDO DE GIRO

PASO. Se denomina paso, a la distancia existente entre dos dientes consecutivos, medido entre puntos homónimos sobre el diámetro mayor o diámetro de cresta (ver Figura 3.8). El paso “*p*”, es un parámetro importante en la identificación de un perno roscado. Un parámetro alterno al paso, es la cantidad de roscas por pulgada “*n*”. El paso y el número de roscas están relacionados por:

$$p = \frac{1}{n} \dots\dots\dots \text{ecuación 3.8}$$

FORMA DEL FILETE. La forma del filete puede ser variada dependiendo del tipo de uso que tenga el perno roscado, pudiendo ser triangular, redonda, cuadrada, trapecial, diente de sierra, entre otras (ver figura 3.9) en está se aprecian algunos ejemplos. Las roscas de tipo triangular son las más comúnmente usadas, y en nuestro caso son las que usaremos para la sujeción del stack, las roscas cuadradas se emplean como medio para transmitir movimiento en husillos de máquinas herramientas y/o dispositivos de elevación. Las roscas circulares y circulares truncadas se emplean en husillos de transmisión de movimiento que tienen bolillas esféricas para garantizar continuidad de desplazamiento en ambos sentidos del husillo

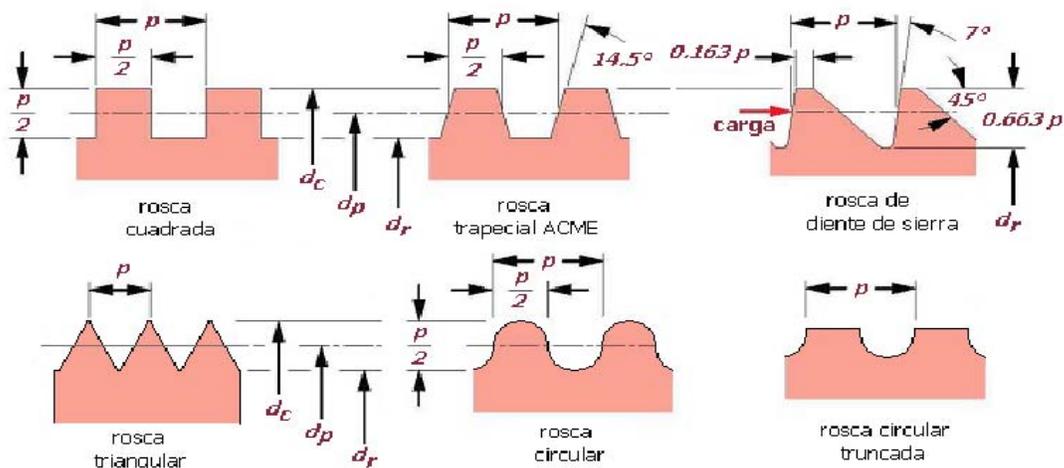


Figura 3.9 Formas de los filetes de una rosca.

ANGULO DE LA ROSCA. En la figura 3.10, se pueden ver algunos ángulos característicos para las roscas trapeciales ACME o las diente de sierra. Sin

embargo, las roscas de filete triangular son las que se discriminan con mayor asiduidad en términos del ángulo de rosca. Así pues, cuando el ángulo de rosca es de 60° , el tipo de rosca corresponde a la identificación unificada o UN, también es el ángulo de la rosca denominada METRICA. Las roscas denominadas WHITWORT tienen un ángulo de 55° . Las roscas triangulares suelen presentar truncamientos en la raíz y en la cresta, para evitar problemas de rotura y optimizar su capacidad de roscado.

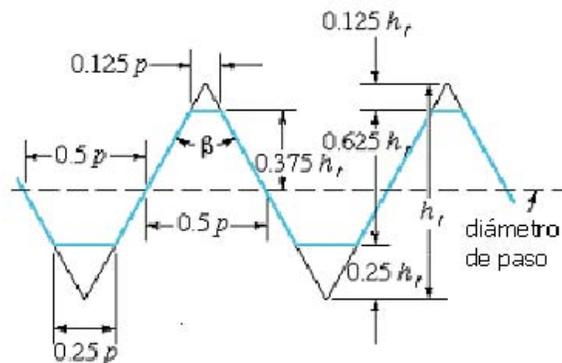


Figura 3.10 Detalles de las roscas UN y Métrica.

En la ecuación 3.9 se muestra una serie de relaciones para las roscas UN y M. Nótese que todos los parámetros geométricos están en función del paso p y de la máxima altura que se obtendría si no estuvieran los truncamientos, y aún esta última puede obtenerse de la ecuación como función del paso, es decir:

$$ht = \frac{p}{2 \tan[\beta/2]} \rightarrow \text{con } \beta = 60^\circ \dots\dots\dots \text{ecuación 3.9}$$

AVANCE. El avance es la distancia longitudinal que avanza un punto de un diente en un giro del perno roscado. En la Figura 3.10 se pueden apreciar tres tipos distintos de avances y de acuerdo a que la rosca sea de dos o tres entradas, el avance será dos o tres veces mayor al correspondiente a una rosca de una entrada.

SENTIDO DE GIRO. El sentido de giro puede ser simplemente dextrógiro o levógiro, en tanto que el perno roscado gire en sentido horario o antihorario cuando es introducido en una tuerca fija.

Los pernos roscados de sujeción y ajuste sirven para mantener firmes miembros o partes diversas. Estos ensambles tienen como elementos afines a las “*arandelas*”, cuya función es mejorar la clase del ajuste y servir como fusible para evitar deterioro en las partes a ensamblar, y también a las tuercas.

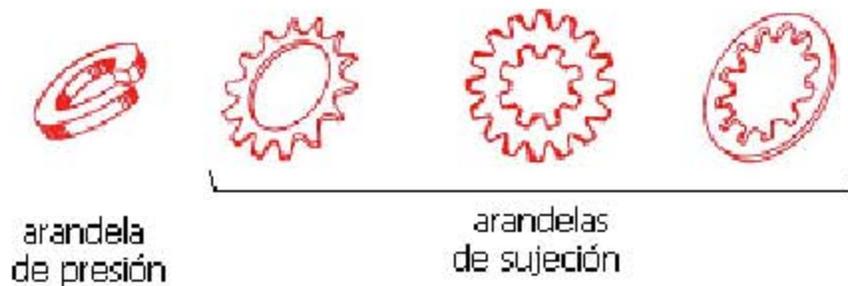


Figura 3.11 Tipos de arandelas.

Los pernos roscados se estiran y la zona de unión se comprime. Esto se puede analizar con mayor detenimiento en la figura 3.12, donde se muestra el ensamble perno y junta como si se tratara de dos resortes. Para representar la junta un resorte a compresión de constante k_m y para representar el tornillo otro resorte a extensión de constante k_b .

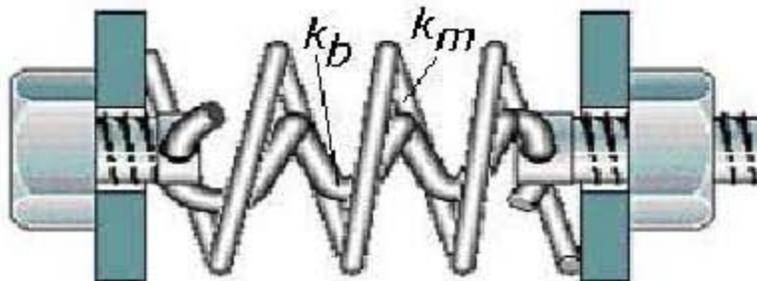


Figura 3.12 Ensamble perno junta.

Se recordará de resistencia de materiales que la rigidez axial para una barra de longitud L , área A y módulo de elasticidad E se obtiene de acuerdo a la ecuación 3.10.

$$k_{barra} = \frac{E.A}{L} \dots\dots\dots ecuación 3.10$$

Control de la precarga. El par de apriete

La precarga en el perno es obviamente un factor importante. Sin embargo la determinación precisa del valor de la precarga, exige que se tenga control de lo que ocurre en los dos extremos del perno o bulón, para poder determinar así la elongación con un comparador o un micrómetro. Si bien esto es posible es costoso y en la mayoría de los casos poco práctico.

Un método práctico para la determinación de la precarga recurre a la consideración de un par de apriete que puede medirse con un torquímetro manual o bien uno neumático (más preciso).

3.4 DETALLE DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

De los capítulos anteriores, puede definirse a la celda de combustible como un dispositivo electroquímico que transforma la energía química de reacción directamente en energía eléctrica, tenemos que agregar que esta transformación de energía no viene sola, ya que también produce calor, el cual en exceso es perjudicial para el desempeño de nuestro stack de celdas de combustible, por lo que, si los elementos que conforman nuestro stack no son debidamente refrigerados pueden alcanzar temperaturas incompatibles o perjudiciales para su desempeño, haciéndose necesario desalojar este exceso de calor por medio de un sistema de refrigeración el cual tendrá como misión principal mantener a los elementos constitutivos del stack dentro de la temperatura de operación adecuadas.

Los sistemas de refrigeración directa son aquellos que disipan el calor directamente al medio circundante. Un ejemplo de estos son los sistemas de refrigeración por aire. Los sistemas de refrigeración indirecta son aquellos que utilizan un fluido para el transporte del calor hasta un dispositivo que lo disipa al

medio circundante. Un ejemplo de estos son los sistemas de refrigeración por agua.

Tras el análisis realizado del sistema de refrigeración en el capítulo anterior, los resultados obtenidos arrojaron como una solución factible el utilizar un compresor o un ventilador para la refrigeración del stack de celdas de combustible para lo cual, también, se tendrá que efectuar un maquinado especial a las placas bipolares, este maquinado, consiste en maquinar unas ranuras a las placas con campos de flujo, en la cara posterior de donde se ubica el campo de flujo, para que al ensamblar estas formen los ductos interiores por donde circule el aire el cual por medio de la convección forzada recogerá el calor que se va generando por la reacción dentro de las celdas, los canales en las placas bipolares se muestran a continuación (*ver figura 3.13*).

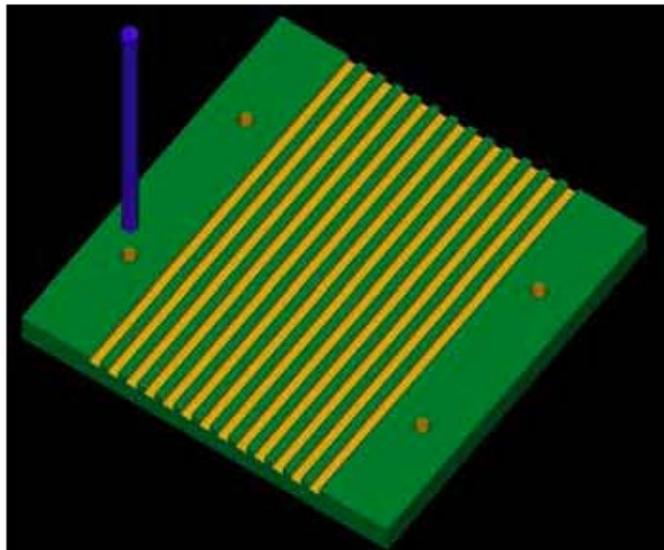


Figura 3.13 Canales para la refrigeración del stack.

Nuestro siguiente paso en el diseño del sistema de refrigeración es definir el número y el tamaño de los ventiladores y/o compresores que se utilizarán en la refrigeración del stack, los cuales dependen del tamaño y del número de celdas unitarias, por lo que se hace necesario tener en claro algunos términos sobre los ventiladores, el calor y la refrigeración, los cuales nos ayudarán a una correcta selección de los componentes del sistema de refrigeración de nuestro stack.

REFRIGERACIÓN

Proceso por el cual se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura baja para un fin.

CALOR

Es una forma de energía en movimiento, ya que siempre está transfiriéndose de los cuerpos calidos a los cuerpos fríos. Según la segunda ley de la termodinámica, el calor fluirá espontáneamente de la región de mayor temperatura a la región de menor temperatura. La transmisión de calor no puede tener lugar sin que exista una diferencia de temperatura. El grado de transmisión de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambas regiones. El calor viaja en tres diferentes formas: Radiación, Conducción y Convección.

TEMPERATURA

La temperatura es la escala usada para medir la intensidad del calor y es el indicador que determina la dirección en que se moverá la energía de calor.

También puede definirse, como el grado de calor sensible que tiene un cuerpo en comparación con otro, la temperatura se mide en grados Fahrenheit, pero en nuestro país, y generalmente en el resto del mundo, se usa la escala de grados Centígrados algunas veces llamada Celsius.

VENTILADORES Y COMRESORES

Tanto los ventiladores como los compresores son considerados como una maquina de fluido térmica, que absorbe energía mecánica y la transfiere a un gas, proporcionándole un incremento de presión, los primeros usan bajas presiones hasta 0.07 [bares] máxima mientras que los segundos manejan presiones de 2.5 [bares] en adelante en los ventiladores la relación de compresión es pequeña por lo que el objetivo principal de un ventilador, es el de producir un flujo de gases de un punto a otro, en nuestro caso particular este gas (aire) actuará como medio de transporte de calor. En los ventiladores el aumento de presión es tan insignificante

comparado con la presión absoluta del gas, que la densidad de este se considera inalterada en el proceso de operación.

CLASIFICACIÓN DE LOS VENTILADORES

Por la trayectoria que sigue el gas

De acuerdo a la trayectoria que sigue el gas, los ventiladores se agrupan de la siguiente manera:

-Ventilador centrífugo: mueve al gas perpendicularmente al eje de rotación, respondiendo mejor a sistemas de alta resistencia.

-Ventilador axial: mueve el gas paralelamente al eje de rotación, prestándose para sistemas de baja resistencia.

-Ventilador de flujo mixto.

Por la forma de los alabes

Por la forma de los alabes es la característica principal que afecta el comportamiento de un ventilador centrífugo de acuerdo a la forma de estos los ventiladores se clasifican de la siguiente manera.

-ventilador de alabes rectos o radiales

-ventilador de alabes hacia atrás

Existen ventiladores centrífugos que son combinación de esta clasificación básica.

Por la presión de descarga

-Ventiladores de baja presión, cuando la presión generada es inferior a 100 mm C. A.(Columna de agua).

-Ventiladores de presión media, cuando la presión se encuentra entre los 100 y 300 mm C. A.

-Ventiladores de alta presión, cuando la presión es superior a los 300 mm C. A. E inferior a los 1000 mm C. A.

En base a los rangos de presiones que manejan los compresores y los ventiladores, y en base al objetivo que perseguimos, que es el de producir un flujo, además de la diferencia de costo entre uno y otro, se opto por la utilización de un

ventilador en vez de un compresor, y de acuerdo a la clasificación de los ventiladores, se utilizara un ventilador axial de baja presión, para el enfriamiento de nuestro stack de celdas de combustible.



Figura 3.14 Aspecto de un stack de celdas de combustible con ductos de enfriamiento entre placas bipolares.

En la figura 3.15 se muestra un ventilador el cual se utilizara para el enfriamiento del stack.



Figura 3.15 ventilador axial de baja presión.

3.5 DETALLE DEL SISTEMA DE CONEXIONES ELÉCTRICAS

Para las conexiones eléctricas lo haremos por medio de una malla fina de acero inoxidable a cada lado de la membrana polimérica, la cual nos permitirá recoger los electrones que se disocian del hidrógeno en el ánodo, para trasladar estos electrones al cátodo se hará por medio de un circuito exterior que será por medio de un cable plano de varios hilos el cual nos da una capacidad de

conducción de 1 amp. o con la membrana conductora, solo que esta tiene menos capacidad de conducción en amperaje, estos dos medios fueron seleccionados del análisis funcional para las conexiones eléctricas y de la ponderación de parámetros. Esta malla fina de acero inoxidable se utilizara por tratarse de placas con campo de flujo de acrílico, ya que este material es prácticamente aislante y por eso se hace necesario utilizar estas mallas para poder recoger los electrones, liberados durante la reacción, además de que tiene que ser de acero inoxidable porque los reactantes (hidrógeno y oxígeno) atacan fuertemente a cualquier material que entre en contacto con ellos, este material de acero inoxidable tiene la propiedad de resistir el ataque químico de los reactivos, además de ser un buen conductor eléctrico, lo que lo hace idóneo para este caso, en la figura 3.16 se muestra la localización de estas mallas dentro del stack.

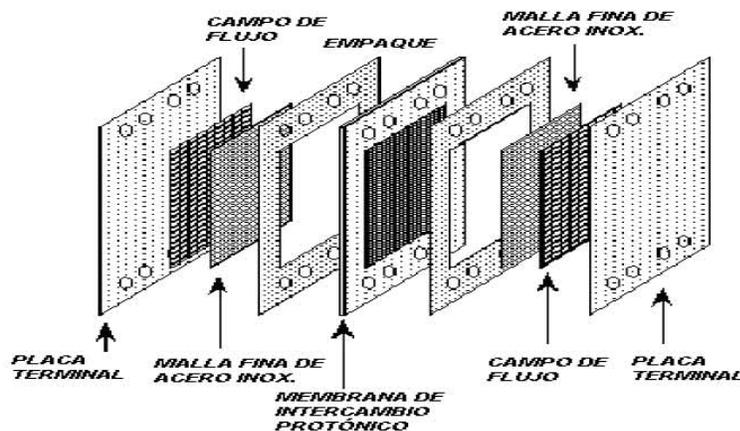


Figura 3.16 Localización de las mallas finas de acero inoxidable dentro del stack.

La conducción de la electricidad en el circuito exterior, la podemos hacer por medio de un conductor eléctrico externo más económico, que ofrezca poca resistencia al flujo de los electrones, por lo que para realizar una correcta selección del conductor eléctrico y de su calibre óptimo, además de una correcta instalación, es necesario familiarizarnos con la clasificación de estos.

CLASIFICACIÓN DE LOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Los conductores eléctricos se pueden clasificar de las formas siguientes:

- Por el voltaje de operación.

- Por su aislamiento.
- Por la construcción del cable/flexibilidad.
- Por el material del conductor.

CLASIFICACIÓN POR EL VOLTAJE DE OPERACIÓN

Esta depende del uso para el cual será destinado el conductor, si es para línea de transmisión o de utilización, se clasifican en baja tensión de 0 a 2000 V en media tensión, de 2001 a 35000 V. y en alta tensión para voltajes mayores a 35000 V.

CLASIFICACIÓN POR EL TIPO DE AISLAMIENTO

Los aislamientos pueden ser termoplásticos o termofijos los primeros al sobrepasar la temperatura de diseño, tienden a modificar su estado tomando la forma que se le imprimió, los segundos no se reblandecen pero se degradan, estos últimos pueden soportar mayores temperaturas. Es indispensable conocer las condiciones del lugar donde será instalado el conductor eléctrico, ya que su aislamiento o cubierta esta diseñada para trabajar bajo ciertas condiciones de humedad, temperatura, ambientes corrosivos, etc.

Los materiales más utilizados para baja tensión son:

THWN-LS que es un PVC (Policloruro de vinilo), antífama además de que es resistente en ambientes húmedos.

THWN es un PVC con una cubierta exterior de NYLON que le proporciona resistencia a la humedad y lo hace ideal para trabajar en ambientes con presencia de sustancias flamables, grasas y productos químicos.

RHW es un polietileno de cadena cruzada con las siguientes ventajas: Alta resistencia a la humedad y a una gran variedad de aceites y de agentes químicos; pudiendo instalarse en ambientes con baja y alta temperatura.

Para alta tensión, los materiales comúnmente utilizados son el EPR (Etileno propileno rubber) y el XLPE (polietileno de cadena cruzada). La utilización de uno u otro depende de las condiciones ambientales.

ESPESOR DEL AISLAMIENTO

El espesor del aislamiento esta relacionado directamente con la tensión de operación del cable y en función del tipo de sistema eléctrico.

CLASIFICACIÓN POR LA CONSTRUCCIÓN DEL CABLE

Principalmente se utilizan conductores de sección circular. La flexibilidad la determina el tipo de cableado, entre mayor es el número de alambres por cable, mayor será la flexibilidad, siendo la flexibilidad un parámetro crítico ya que influirá en la vida útil del cable.

CLASIFICACIÓN POR EL MATERIAL CONDUCTOR

Normalmente los conductores para instalaciones eléctricas se hacen de cobre y aluminio.

En circuitos electrónicos especializados se llega a utilizar el oro y la plata por ser los metales con mayor conductividad eléctrica; por supuesto estos no pueden ser utilizados en nuestro stack de celdas de combustible por su escasez y principalmente por su alto costo.

El aluminio en comparación con el cobre tiene un menor peso, pero debido a la dificultad que se tiene para realizar empalmes o uniones su uso es restringido.

El éxito en la utilización del cobre, se basa en su conductividad y sus propiedades mecánicas, debido a su capacidad de conducción de corriente lo convierte en el más eficiente conductor eléctrico además de ser el de menor costo.

Después de tener una idea más clara de la clasificación de los conductores, nos enfocaremos en la selección de un conductor para nuestro stack de celdas de combustible y en base a que nuestro stack trabajara por debajo de los 2000 V. Se optara por un conductor de baja tensión ya que en el circuito exterior no tenemos el problema por el ataque químico que se presenta en el interior, el cable plano es ideal para las condiciones ambientales a las que estará trabajando, además de contar con un aislante que lo protege contra el medio ambiente en el que trabajará y de corto circuitos, evitando de este modo que tome otro camino el flujo de electrones. En los conductores sólidos la corriente eléctrica

es transportada por el movimiento de los electrones; y en disoluciones y gases, lo hace por los iones, en nuestro caso haremos énfasis por el movimiento de los electrones ya que en el circuito exterior el material conductor será de cobre.

Otra de las propiedades de los materiales conductores es la resistencia que es la propiedad de un objeto o sustancia que hace que se resista u oponga al paso de una corriente eléctrica. La resistencia de un circuito eléctrico determina cuánta corriente fluye en el circuito cuando se le aplica un voltaje determinado—según la ley de Ohm—. La unidad de resistencia es el ohm, que es la resistencia de un conductor si este es recorrido por una corriente de un amper cuando se le aplica una tensión de 1 volts. La abreviatura habitual para la resistencia eléctrica es R, y el símbolo del ohm es la letra griega omega. En algunos cálculos eléctricos se emplea el inverso de la resistencia, $1/R$, que se denomina conductancia y se representa por G. La unidad de conductancia es siemens, cuyo símbolo es S.

Ya que la corriente es determinada en una celda de combustible por el área activa de la membrana, tenemos en el stack una área de 25 cm^2 por cada celda unitaria, pretendiendo una producción de un total de 60 watts por todo el stack por lo que la corriente que nos proporciona este stack no sobrepasa de 1 amp. Lo cual nos da como resultado que el cable plano es el ideal para hacer esta conexión eléctrica para recoger el flujo de los electrones y direccionarlos hacia la carga en la figura 3.17 se muestran algunos tipos de cable plano utilizados para las conexiones eléctricas.

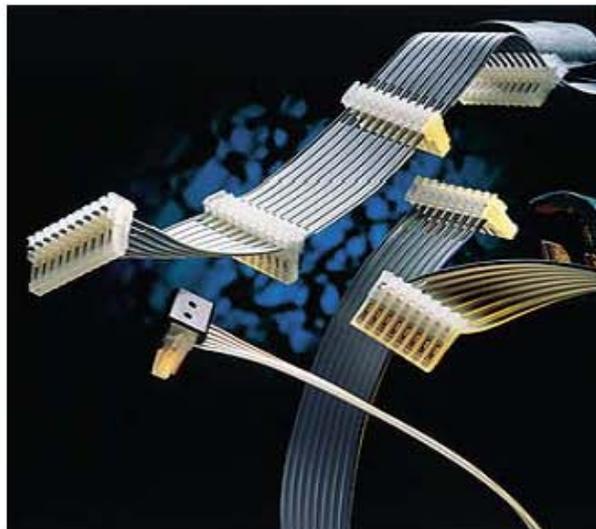


Figura 3.17 Tipos de cable plano.

Dependiendo de las celdas que conformen el stack será el número de conductores del cable plano que se utilizarán y de acuerdo a estas necesidades podemos cortar este cable para utilizar solo lo que necesitamos, y separarlos para conectar a cada celda como se muestra en seguida (ver figura 3.18).



Figura 3.18 Corte del cable plano y seccionamiento de los hilos.

La resistencia de un conductor viene determinada por una propiedad de la sustancia que lo compone, conocida como conductividad, por la longitud por la superficie transversal del objeto, así como por la temperatura. A una temperatura dada, la resistencia es proporcional a la longitud del conductor e inversamente proporcional a su conductividad y a su superficie transversal.

Generalmente, la resistencia de un material aumenta cuando crece la temperatura. La mayoría de los conductores eléctricos empleados en las instalaciones eléctricas son de cobre o de aluminio, pues poseen buena conductividad. Comparativamente el aluminio tiene aproximadamente el 84 % de la conductividad del cobre, pero es más liviano; en lo referente al peso, puede tenerse con el mismo peso casi cuatro veces mayor cantidad de conductor de aluminio, que de cobre.

Es práctica común en nuestro país, emplear el sistema de calibración de conductores denominado American Wire Gage (AWG), sin embargo deberán

manejarse las dimensiones en milímetros cuadrados (mm^2) para estar de acuerdo a lo estipulado por la NOM.

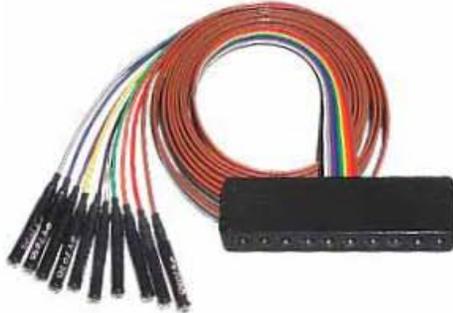


Figura 3.19 Cable plano seccionado con conexiones.

Como se menciono anteriormente estos sistemas no son todos, pero si, los más básicos e importantes para la manufactura del stack, otro sistema que cabe mencionar y que no sometió a estudio es la de la distribución de los gases a cada una de las celdas unitarias dentro del stack el cual se puede hacer por medio de manifold interno y esto se logra con el maquinado de las placas con campo de flujo, así mismo definir si el recorrido de los gases se hará en forma paralela o en serie. Este manifold también puede hacerse externo a través de conductos externos y conexiones para el flujo en nuestro caso utilizaremos el manifold interno y del cual se hablará en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4

FABRICACIÓN DE PROTOTIPO

Un prototipo, es una aproximación de un producto a lo largo de una o más dimensiones de interés. Los prototipos físicos, son artefactos tangibles creados para representar la entidad y los aspectos de interés de esta entidad, para su experimentación y prueba.

4.1 PROTOTIPO

El objetivo de un prototipo o modelo físico del stack de celdas de combustible tipo PEM utilizando los componentes que conformaran los sistemas de interés (sellado, sujeción, refrigeración y conexiones eléctricas), para someterlos a experimentación y pruebas, es permitir una mejor comprensión de los fenómenos que tienen lugar en el apilado de celdas de combustible y en segundo lugar, la retroalimentación para mejorar los sistemas en estudio del stack de celdas de combustible.

En la operación del stack de celdas de combustible tipo PEM, podemos distinguir dos puntos fundamentales en su estudio, el diseño y la operación.

En el diseño del stack de celdas de combustible para su montaje podemos observar que esta formado por las siguientes partes fundamentales, las placas bipolares, la capa difusora, los electrodos el cátodo y ánodo, y la membrana de intercambio protónico, las cuales se describieron ampliamente en el primer capítulo.

En la construcción de nuestro prototipo del stack de celdas de combustible el criterio para la selección de los materiales de construcción fue con base a los recursos disponibles buscando cubrir los objetivos planteados al inicio de este trabajo.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PRIMER PROTOTIPO

Este prototipo se fabricó en acrílico transparente de 6mm para simular las placas bipolares que en algunos casos son de grafito de alta densidad o algún metal conductor de la electricidad, este prototipo consta de 4 placas bipolares y 2 monopolares, en estas placas de acrílico se maquinaron los campos de flujo, al utilizar este material, para la simulación de las placas bipolares, nos representa ciertas ventajas que se describirán en seguida; una de ellas es que nos permite observar como se comportan cada uno de los materiales involucrados en el sellado y la sujeción, así como la influencia e interacción entre uno y otro sistema, ya que se encuentran estrechamente vinculados, una ventaja más es que nos

permitió visualizar la influencia de los sistemas de sellado y sujeción en los campos de flujo al inyectarle algún gas, aire o fluido que contenga algún color para facilitar su observación.

En lo referente a la manufactura de las placas bipolares, se realizó de la siguiente manera, en primer lugar las placas de acrílico se escuadraron apilando las placas y de manera simultanea, en seguida se realizo el maquinado para la simulación de los campos de flujo en cada una de las placas y por separado, en ambos lados para las bipolares y en un solo lado para las monopolares o terminales.

El sistema para la distribución de los gases y desalojo de los productos de la reacción (H_2O), así como los barrenos para los pernos de cada celda, se realizó por medio del maquinado de un barreno en las mismas placas bipolares, haciendo un distribuidor múltiple para alimentar y distribuir interiormente a cada celda, lo anterior se realizó apilando las placas y de manera simultanea, la alimentación se hizo extendiendo el canal de flujo hasta el múltiple en ambas caras de la superficie de la placa con campos de flujo, (ver figura 4.1).

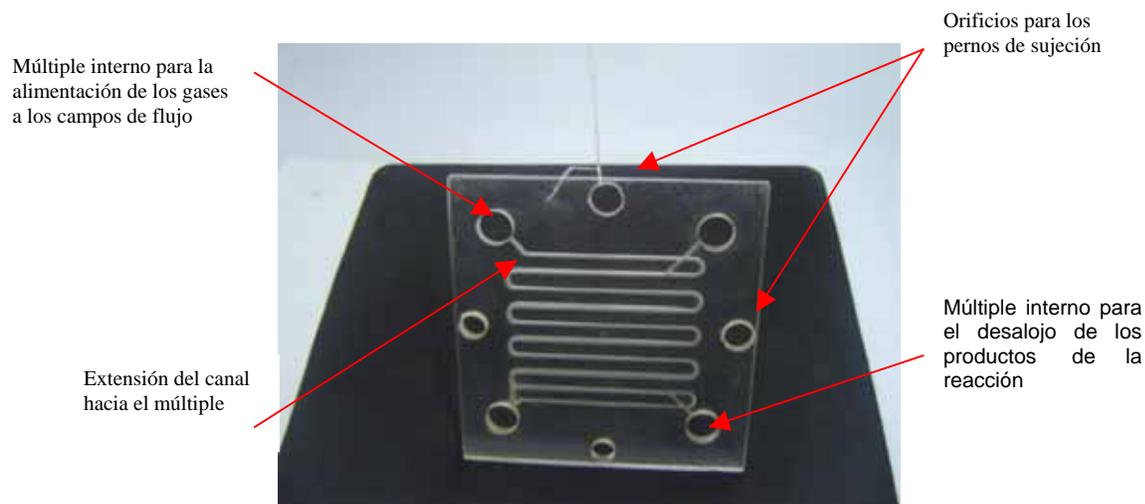


Figura 4.1 Placa de acrílico con campos de flujo en ambas caras para simular las placas bipolares.

La alimentación de cada celda, se puede hacer en serie o en paralelo, ya que dependiendo del arreglo la caída de presión es mayor en el arreglo en serie y

menor en el arreglo en paralelo, por lo que para la distribución de los gases dentro del stack se optó por hacerse en forma paralela, con un múltiple que distribuye a todas las celdas al mismo instante con lo cual se pretende, que todas las celdas trabajen al mismo tiempo y nos entreguen un flujo de electrones mayor que si se distribuyera en forma serial.

En lo referente a la sujeción y en particular a las placas de cierre las cuales serán de acero A-283-C de 3/8" de espesor, con lo cual se pretende una distribución de la presión de manera uniforme a estas placas de cierre se les maquina una ventana para que nos facilite la observación de la interacción de los componentes de los sistemas de sellado y sujeción, así como la influencia de los campos de flujo al introducirle algún gas o fluido, (*ver figura 4.2*).

En referencia al maquinado de las placas de cierre, su proceso de elaboración se llevo a cabo de la siguiente manera, primero se escuadraron las placas, en seguida se realizó la ventana para facilitar la observación de los elementos y por último los barrenos para la alimentación y desalojo de productos, así como los barrenos para los pernos de sujeción, el proceso se realizó apilando las placas y de manera simultánea.

En referencia a los elementos de sujeción, el número de estos así como su distribución para la sujeción y la transmisión uniforme de la presión de compresión hacia las placas bipolares, será de 4 pernos roscados, localizados en la parte central de cada vértice como se muestra a continuación (*ver figura 4.2*).

Una función más que desarrollaran los pernos de sujeción, es que servirán de guía para la correcta colocación de cada uno de los componentes que conforman este primer prototipo del stack de celdas de combustible.

4.2.1 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS CON EL PRIMER PROTOTIPO

El primer prototipo que se construyó (*ver figura 4.2*), el cual se utilizó para experimentar con los sistemas de sellado y sujeción, y en el que se experimentó con diferentes materiales para la simulación de la membrana de intercambio protónico, lo anterior es por que la membrana original tiene un costo muy elevado

y no se tiene fácil acceso a ella, en este primer prototipo solo se utilizaron los materiales que simulaban la membrana protónica como sello, ya que de acuerdo con la investigación realizada, en la literatura, se hace referencia a que las membranas de intercambio protónico forman parte del sistema de sellado, por lo que en este primer prototipo, se probaron algunos materiales como el hule cristal y la mica para simular dicha membrana la selección de estos materiales se realizó en base a que presentan una consistencia similar a la membrana de intercambio protónico original, desprendiéndose las siguientes experiencias al trabajar con estos materiales.

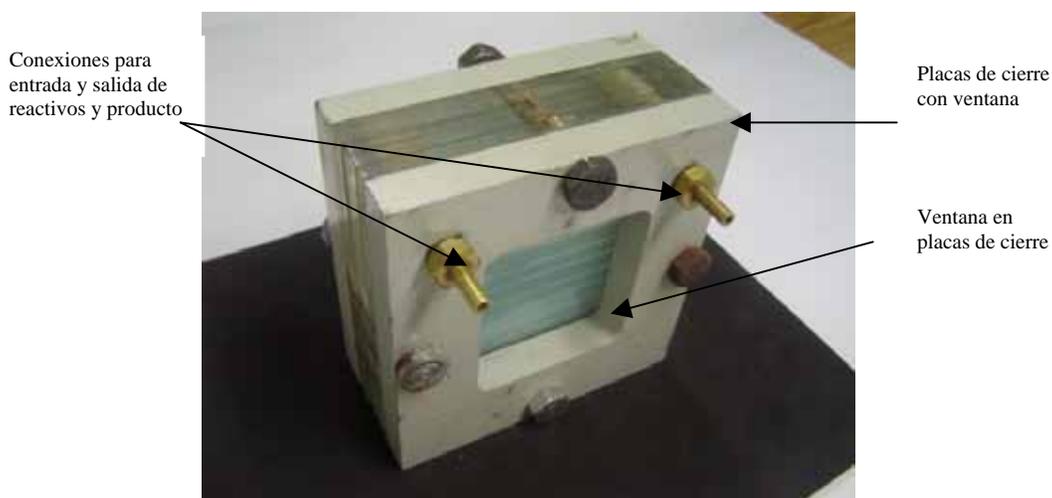


Figura 4.2 Primer prototipo del stack de celdas de combustible tipo PEM.

4.3 SIMULACIÓN DE MEMBRANAS CON HULE CRISTAL

La primera prueba de sellado se realizó utilizando hule cristal para simular las membranas de intercambio protónico, el cual nos proporcionó un buen sellado hacia el exterior, pero presentando el inconveniente, de que por ser un material muy blando, se introduce a los canales del campo de flujo obstruyendo el paso del fluido con el cual se trabaja como se puede observar en la figura 4.3, provocando que los flujos de ambos lados de la membrana se mezclaran, lo cual es excesivamente perjudicial para el desempeño de un stack, este inconveniente se pretendió solucionar por medio del sistema de sujeción, al aplicarle un torque mayor y uniforme a cada uno de los pernos en forma cruzada y de manera

gradual, lo anterior se llevo acabo sin alcanzar el objetivo esperado, es decir no se pudo evitar que los flujos se mezclaran, la mezcla de flujos se observo al introducirle agua a presión con diferente color en cada uno de los múltiples de alimentación.



Figura 4.3 Hule cristal para simulación de membrana de intercambio protónico.

En cuanto al sistema de sujeción para este primer prototipo el problema que se presento fue que al aplicarle un torque mayor a los pernos para eliminar las fugas internas se excedió de su limite plástico provocando la fractura de los mismos lo que nos obligó a utilizar pernos de alta resistencia para poder dar un apriete mayor sin ninguna dificultad.

En lo referente a las placas de cierre del sistema de sujeción no presentaron ningún problema en este primer prototipo solo cabe mencionar que para inyectar los fluidos al interior del stack de celdas de combustible se utilizaron conexiones comerciales de bronce (ver figura 4.2).

4.4 SIMULACIÓN DE MEMBRANAS CON MICA

La segunda prueba de sellado que se realizó al primer prototipo fue simulando la membrana de intercambio protónico con mica este plástico ofreció resultados satisfactorios, ya que no se incrusta en los canales por tratarse de un plástico menos blando como se puede observar en la figura 4.4, además, de proporcionar un buen sellado por lo que no se presentaron fugas hacia el exterior

al introducir aire a presión, pero si se presento una ligera fuga interior que se pudo remediar dándole un torque mayor y uniforme a todos los pernos.

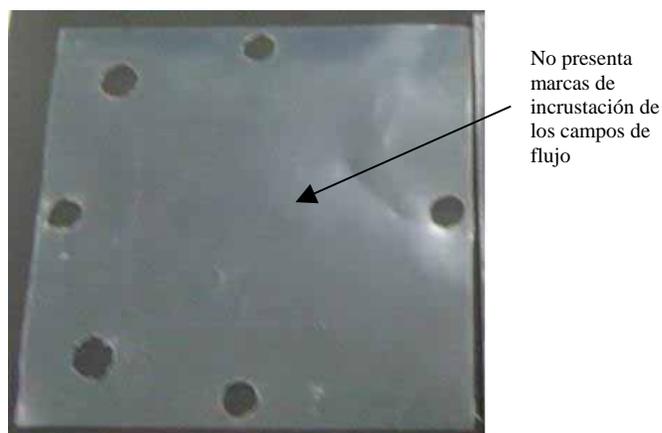


Figura 4.4 Mica para simulación de membrana de intercambio protónico.

Otra de las variantes en la realización de las pruebas para la simulación de la membrana con los diferentes materiales, fue observar la alimentación del flujo por medio del múltiple para la distribución en los campos de flujo de cada una de las celdas del stack, lo anterior se realizó introduciéndole agua con colorante para facilitar la visualización del recorrido del fluido a través de los campos de flujo, con lo que se observó que primero se llena el múltiple y posteriormente se distribuye a cada uno de los campos de flujo, resultando satisfactoria la distribución de los reactivos (ver figura 4.5).



Figura 4.5 Visualización de los canales de flujo y el múltiple.

De acuerdo a lo observado durante las pruebas con los diferentes materiales en este primer prototipo podemos deducir que tanto el sistema de sellado como el sistema de sujeción están íntimamente ligados ya que el sistema de sellado depende del sistema de sujeción y viceversa, por lo que para reducir o eliminar las fugas se aplicaba un torque mayor a los pernos. En referencia al sistema de sujeción y particularmente a los pernos y su relación con las placas bipolares de acrílico, se observó que al aumentar el torque con la finalidad de eliminar las fugas, tanto internas como externas, que se presentaban por el sistema de sellado tiene consecuencias negativas en las placas bipolares, ya que, al aumentar el torque provocaba la fractura de las placas bipolares en las proximidades de los barrenos para el perno como se puede observar en la figura 4.6 lo que traía como consecuencia fugas internas y externas en estas zonas.

Otro punto muy importante que se tiene que tomar en cuenta y no es precisamente en referencia a las propiedades de los empaques ni con el sistema de sujeción, es el maquinado de las placas con campo de flujo, el cual influye significativamente en el sellado del stack, por lo que, los canales no deben estar muy cerca del múltiple que alimenta a cada celda unitaria, ya que de acuerdo a lo observado esto puede producir fugas internas o mezcla de los reactivos antes de disociarse, como ya se mencionó con anterioridad, esto es excesivamente perjudicial para el desempeño del stack de celdas de combustible.

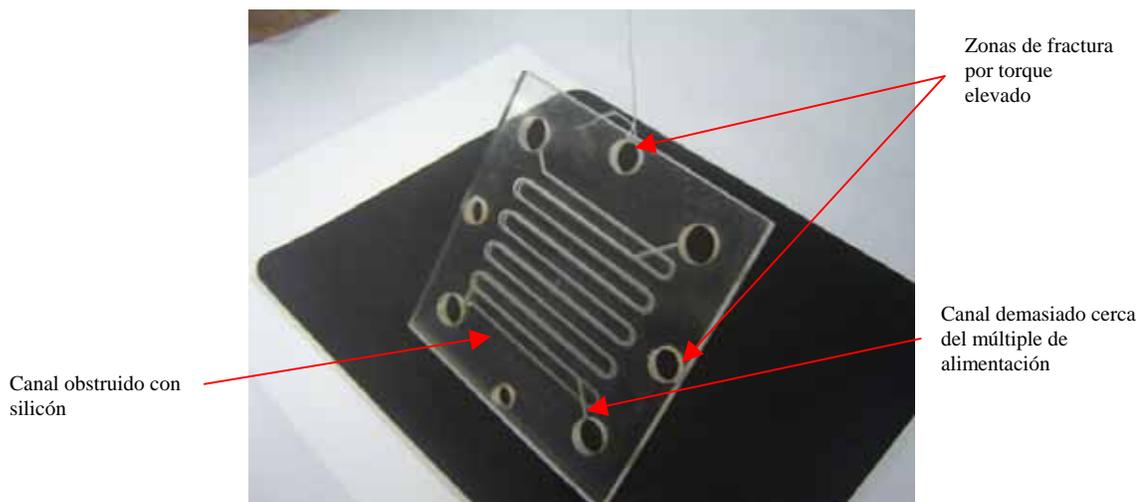


Figura 4.6 Placa bipolar con canal de alimentación obstruido.

Este problema lo pudimos solucionar, eliminando el canal más próximo al múltiple de alimentación, obstruyéndolo con silicón transparente y modificando el canal de alimentación para que alimentara el canal del campo de flujo siguiente (*ver figura 4.6*).

Todos estos problemas encontrados en los sistemas en el primer prototipo del stack se trataran de subsanar con la construcción de un segundo prototipo que incluirán los sistemas de refrigeración y conexiones eléctricas que por ser las placas bipolares de acrílico nos vemos en la necesidad de introducir una malla de acero inoxidable en ambos lados de la membrana, una para la recolección de los electrones desprendidos en la disociación del hidrógeno del lado del ánodo y la otra en el lado del cátodo, para la captación y distribución de los electrones que vienen del ánodo a través del circuito exterior para su reacción con el oxígeno y completar de este modo la reacción para formar el agua.

4.5 DESCRIPCIÓN DEL SEGUNDO PROTOTIPO

Para el armado del segundo prototipo del stack de celdas de combustible, el criterio de selección de los materiales, fue el mismo que para el primer prototipo, es decir, en base a los recursos disponibles y buscando cubrir el objetivo planteado, en este segundo prototipo, se tomaron en consideración los resultados arrojados por el análisis funcional, las tablas de ponderación y la matriz de decisión desarrollados en el capítulo 2, también se tomaron las medidas preventivas para subsanar los problemas presentados por el primer prototipo, en los sistemas de sellado y sujeción, a este segundo prototipo, se le adicionaron los sistemas de refrigeración y de las conexiones eléctricas, en los que se realizaron las pruebas pertinentes.

En base a los recursos disponibles, el segundo prototipo se elaboró nuevamente de acrílico transparente de 6mm de espesor, para simular las placas bipolares con campos de flujo y de este modo aprovechar las ventajas del material citadas con antelación, en la manufactura de las placas se realizaron algunas modificaciones las primeras para eliminar los problemas de fugas, tanto internas como externas por concepto del sistema de sellado y por los resultados arrojados

durante el desarrollo del capítulo 2 las segundas para remediar los problemas presentados por la sujeción y algunas más por las dimensiones de la membrana de intercambio protónico que nos proporcionaron.

Las primeras modificaciones, realizadas a las placas bipolares, para eliminar los problemas de sellado, fueron que los campos de flujo no quedaran tan próximos al múltiple de alimentación, como se puede observar en la figura 4.7 además para enmendar los problemas y mejorar el sistema de sellado adicionalmente se introduce el O-ring para lo cual se requiere de un maquinado especial en las placas bipolares ya que deben contar con una ranura o canal en la cual se alojará el O-ring (ver figura 4.8).

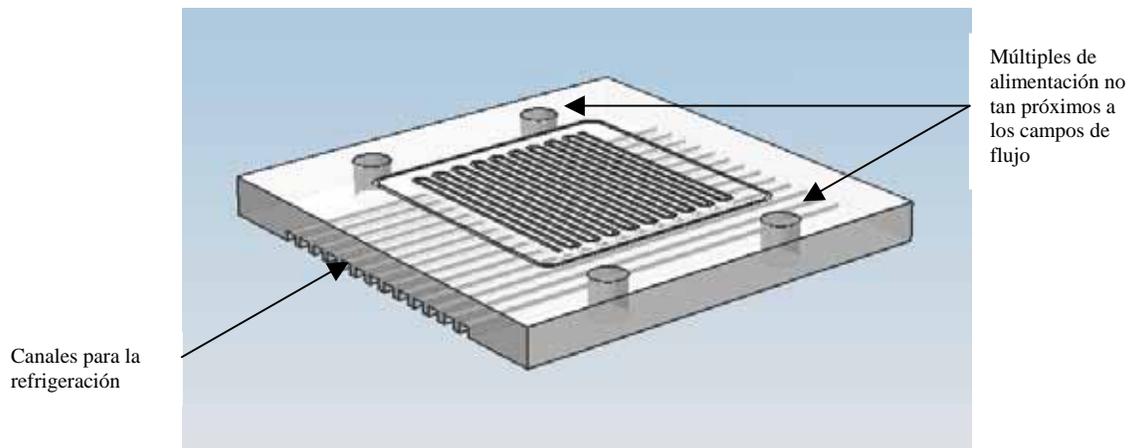


Figura 4.7 Placa bipolar con modificaciones para mejorar sistema de sellado.

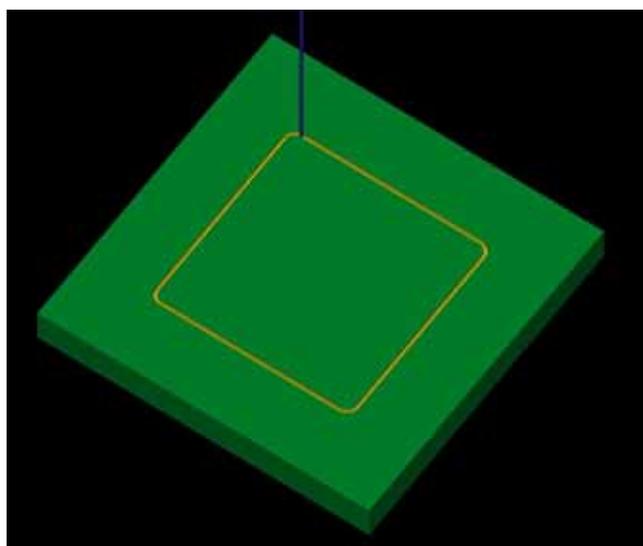


Figura 4.8 Simulación del maquinado de la ranura para alojar el O-ring.

La modificación realizada a las placas bipolares para eliminar los problemas presentados en el primer prototipo por concepto del sistema de sujeción es sencilla ya que los barrenos para los perno de sujeción no fueron realizados dentro del área que conforma la placa por lo que los pernos quedaron fuera de esta con esto se evito la fractura de las placas bipolares en las proximidades de los barrenos para los pernos, al aplicar los torques requeridos en los mismos.

Las modificaciones a las placas bipolares por concepto de la membrana son enfocadas hacia las dimensiones del área activa de la membrana la cual es de 5x5 cm por lo que el maquinado del campo de flujo se debió restringir a esta área, cabe mencionar que para la simulación tanto los campos de flujo como la ranura para el O-ring se realizaron utilizando un software comercial denominado Mastercam ® (ver figura 4.9) por medio de esta simulación se obtiene el código maquina para introducirlo a la fresadora de CNC y de este modo realizar el maquinado de las placas (ver figura 4.10).

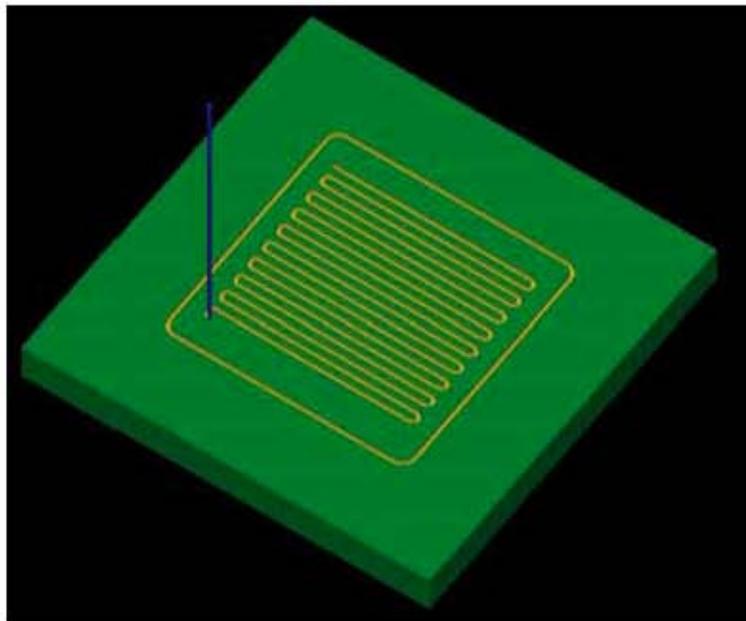


Figura 4.9 Simulación del maquinado de los campos de flujo y la ranura del O-ring en Mastercam.



Figura 4.10 Maquinado de las placas con campos de flujo con CNC.

En lo referente al conjunto de la membrana polimérica de intercambio protónico con electrodos y capas difusoras, se utilizó una fabricada expresamente para una celda de combustible tipo PEM, esta membrana como se dijo anteriormente, cuenta con un área activa de 5x5 cm.

El sistema de sujeción para este segundo prototipo, se conformo con placas terminales de acero al carbono A 283-C de 1/4" de espesor, en las que también se les maquinó una ventana para permitir la visualización y la interacción de los elementos que conforman los diferentes sistemas, en lo referente a los pernos de sujeción, se utilizaron 8 pernos en lugar de 4, buscando con esto una presión de compresión más homogénea en las placas bipolares, estos pernos se colocaron fuera del área de las placas bipolares, pues estos solo actúan en las placas terminales y a partir de estas que transmite la presión de compresión a las placas bipolares, al sacar los pernos fuera del área de las placas bipolares, nos permitió evitar fugas a consecuencia de fracturas de las placas bipolares en las proximidades de los barrenos para los pernos al aplicar el torque a estos, en cuanto a la localización y distribución de los pernos esta se puede observar enseguida (ver figura 4.11).

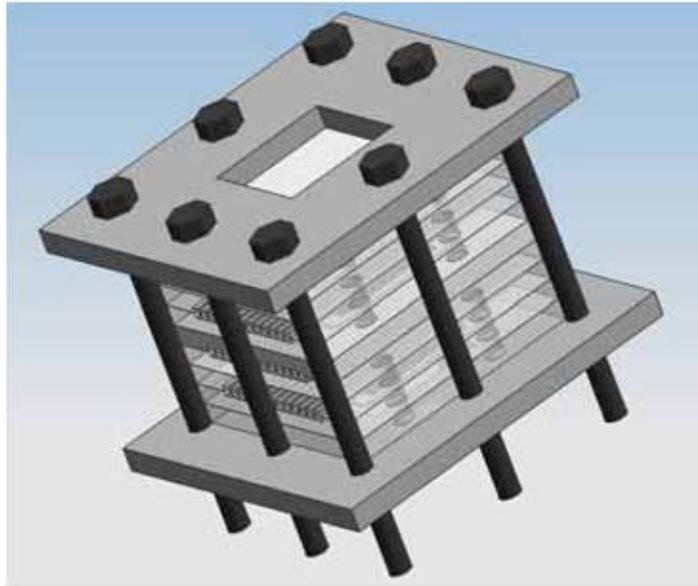


Figura 4.11 Distribución de los pernos de sujeción del segundo prototipo.

A este segundo prototipo, se le adicionó el sistema de refrigeración el cual y de acuerdo al resultado arrojado durante el capítulo 2, se conformará por un ventilador axial que hará circular el aire a través de los canales de refrigeración, que fueron maquinados en las placas bipolares, una simulación del maquinado de estos se puede observar a continuación (*ver figura 4.12*), mientras que en la figura 4.7 se puede observar la placa bipolar con canales de refrigeración, campos de flujo y ranura para el O-ring.

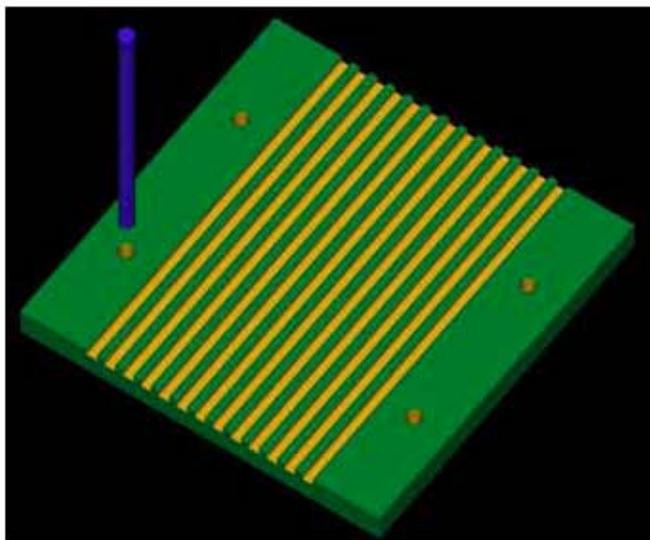


Figura 4.12 Simulación en Mastercam del maquinado de los canales de refrigeración.

Para las conexiones eléctricas al interior de la celda se realizó por medio de una malla de acero inoxidable con una abertura de 0.178 mm calibre 39 de acero 304 de 80 x 80 hilos por pulgada con un área de contacto de 5 x 5 cm la cual nos permitió recoger los electrones disociados del hidrógeno para trasladarlos al cátodo por medio de un circuito exterior después de realizar un trabajo útil, al introducir esta malla de acero inoxidable para la recolección de los electrones nos obligo a realizar el maquinado de una caja extra en las placas bipolares, esta caja alojo y compenso el espesor de la malla junto con las capas difusoras y el MEA, en cuanto a las conexiones para el circuito exterior se realizó por medio de cable plano de 14 hilos para una tensión de 300 volts con una resistencia a la temperatura de 105⁰ C con aislante de PVC

4.6 SEGUIMIENTO PARA LA MANUFACTURA DEL STACK

- Escuadrar las placas de acrílico a la medida deseada.
- Maquinar el campo de flujo en ambas caras para las placas bipolares y en una cara para las placas terminales.
- Maquinado de caja para compensar espesores de MEA, malla de acero inoxidable, etc.
- Alinear el conjunto de placas con campos de flujos para barrenar el múltiple de distribución de gases y desalojo de agua.
- Realizar barrenos para conexión de campos de flujo con múltiple y salida de los cables para las conexiones eléctricas.
- Escuadrar a la medida las placas de cierre.
- Abrir ventana en placas de cierre.
- Realizar barrenos para los pernos de sujeción.
- Hacer barrenos para la alimentación y desalojo de reactantes.
- Realizar rosca en los barrenos de alimentación y desalojo para ensamblar las conexiones de bronce.
- Alinear el conjunto de placas de cierre con las placas de campos de flujo para realizar barrenos guía para el ensamble.

ENSAMBLE

1. Colocar en la placa de cierre los pernos guía.
2. Colocar sello para aislar el stack de la placa de cierre.
3. Colocar la primera placa terminal.
4. Colocar empaque para el sellado entre placas con campo de flujo.
5. Colocar malla de acero inoxidable evitando dañar la membrana de intercambio protónico.
6. Colocar el MEA con capas difusoras.
7. Colocar la siguiente malla de acero inoxidable evitando dañar la membrana de intercambio protónico como se menciona anteriormente.
8. Colocar empaque para el sellado entre placas con campos de flujo.
9. Colocar la primera placa bipolar con campos de flujo.
10. Repetir los puntos del 4 al 8 hasta la tercera placa bipolar.
11. Colocar empaque para el sellado entre placas con campo de flujo.
12. Colocar malla de acero inoxidable evitando dañar la membrana de intercambio protónico.
13. Colocar el MEA con capas difusoras.
14. Colocar la siguiente malla de acero inoxidable evitando dañar la membrana de intercambio protónico como se menciona anteriormente.
15. Colocar empaque para el sellado entre placa con campos de flujo.
16. Colocar la segunda placa terminal.
17. Colocar sello para aislar el stack de la placa de cierre.
18. Colocar la segunda placa de cierre.
19. Colocar pernos roscados con rondana plana y de presión con contratuerca en el ensamble.
20. Aplicar torque uniformemente a los pernos como se menciona en el apartado 4.3

La fabricación de un prototipo es además de necesaria muy útil para poder comprobar que los sistemas que se están diseñando cumplen con los requerimientos funcionales impuestos por las especificaciones de diseño, además de que al fabricar el prototipo en ocasiones se encuentran soluciones más prácticas que las propuestas originalmente así el diseño de detalle se retroalimenta de la experiencia que deja la fabricación del prototipo para poder llegar finalmente a un producto óptimo que cumpla completamente con las especificaciones de diseño.

CONCLUSIONES

El objetivo principal planteado al inicio de este trabajo se cumplió, en gran medida el cual como se mencionó fue el de diseñar los sistemas estructurales para el apilamiento de celdas unitarias y así conformar un stack de celdas de combustible tipo PEM de mayor capacidad que los construidos en México a nivel laboratorio, ya que aplicando un método de diseño, se determinaron los sistemas estructurales específicos, como son los sistemas de sellado, sujeción, refrigeración y de conexiones eléctricas, de los cuales, se obtuvieron conclusiones particulares para cada sistema y que se presentan a continuación.

Con respecto al sistema de sellado, diseñado para el stack, el cual se conforma por el teflón y el O-ring que junto con la membrana de intercambio protónico forman un sello satisfactorio, se observó que se obtienen buenos resultados, ya que se cumple con el objetivo principal, es decir, el de evitar la fuga de reactivos hacia el exterior o su posible combinación dentro del stack, lo cual como se mencionó con anterioridad resultaría extremadamente perjudicial tanto para la eficiencia del stack como para la vida útil de la membrana de intercambio protónico.

En referencia a la compatibilidad química entre los mismos componentes que conforman el sistema de sellado, así como su compatibilidad química de estos con los demás componentes que conforman el stack y con los reactivos, no existe ningún problema, ya que las reacciones químicas entre estos son nulas.

El diseño del sistema de sujeción del stack, el cual lo conforman un conjunto de 8 pernos comerciales de alta resistencia con dos placas de cierre de acero, los cuales realizan la función de una prensa, la cual cumple con el objetivo principal del sistema de sujeción, que es el de proporcionar una unión mecánica entre los componentes del stack. La unión mecánica deseada con los componentes antes mencionados que conforman el sistema de sujeción, se consigue sacrificando tanto el peso como el volumen del stack, pero sobre todo el peso, ya que, el sistema de sujeción con los componentes mencionados, representa hasta el 80% del peso total del stack, al mismo tiempo, en volumen, mientras que los otros componentes que conforman el stack como la membrana, los electrodos, las capas difusoras y la maya de acero inoxidable son de apenas unas décimas de milímetro y las placas de acrílico, las cuales hacen las veces de placas bipolares son de 6 milímetros de espesor, las placas de cierre empleadas en el primer prototipo son de 3/8" y las del segundo prototipo son de 1/4" en ambos casos de acero al carbono A-283-C mientras que en el primer prototipo las placas de cierre son de menores dimensiones, en el segundo prototipo para evitar los problemas presentados durante el armado las dimensiones de las placas de

cierre aumentaron. Y para ambos prototipos se observa un claro contraste con los otros sistemas en cuanto al peso y volumen del stack.

Con respecto a la compatibilidad química de los componentes del sistema de sujeción con los otros elementos que conforman el stack, no se presentó ningún inconveniente, por lo que los materiales empleados para el armado de ambos prototipos son satisfactorios. Cabe mencionar, que en el caso de que las placas bipolares fueran de grafito de alta densidad o algún otro material conductor como los metales, se tendría que tener mayor cuidado en la selección de los materiales del sistema de sujeción, lo anterior para evitar los pares galvánicos o los cortos circuitos que se pudieran generar por la incorrecta selección de los materiales.

En cuanto a la sujeción tipo prensa, con puntos de presión localizada, la cual, generan deformaciones locales en las proximidades de los pernos no solo en las placas de cierre sino en los demás componentes del stack llegando a sobrepasar los límites elásticos de algunos componentes como las placas bipolares, se resolvió sacando los pernos fuera del área de las placas bipolares así, las deformaciones locales solo incidirán en las placas de cierre.

En referencia al sistema de refrigeración, por las dimensiones del stack tanto del número de placas como por el área activa, la implementación de un ventilador axial es suficiente, ya que la cantidad de calor generado se disipa rápidamente sin crear ningún problema al interior del stack, como podría ser resequedad de la membrana lo cual, como se mencionó con anterioridad, afectaría el desempeño del stack, por lo anterior el sistema de refrigeración propuesto, cumple con el objetivo deseado, el cual, es el de mantener una temperatura de funcionamiento constante que oscila entre 80 y 85° C. Ya que según los expertos en el tema, recomiendan la refrigeración para stacks mayores de 5 celdas unitarias.

Para el sistema de conexiones eléctricas aunque es bien sabido de la existencia de materiales con mejores características de conducción eléctrica, cada

uno con sus ventajas y desventajas, por la disponibilidad comercial, se utilizó el cable plano de cobre para realizar la conexión de las celdas que conforman el stack, solo se requiere saber cuales son los requerimientos del sistema a alimentar, para realizar la conexión de las celdas que conforman el stack, ya sea en serie o en paralelo.

Por otro lado el panorama general en cuanto a las oportunidades de desarrollo de las celdas de combustible en México son en extremo prometedoras ya que abarca un gran número de industrias involucradas en el sector energético, comunicaciones, automotriz, etc. cada una de estas industrias enfocadas en la comercialización de productos, que hoy en día son indispensables como, teléfonos celulares, computadoras portátiles, automóviles, etc., que necesitan energía para su funcionamiento y las celdas de combustible son una alternativa para suministrarle dicha energía.

Por lo anterior se requiere incrementar esfuerzos y recursos para el apoyo en la investigación y desarrollo de materiales que conforman la celda de combustible lo anterior en busca de materiales alternos o en la reducción de costos de la manufactura de los mismos sin olvidar los aspectos que involucran la generación, almacenamiento y distribución del hidrógeno tan vital e indispensable para el funcionamiento de una celda de combustible tipo PEM.

APENDICE A

TABLA A.1 GUÍA DE COMPATIBILIDAD QUÍMICA DE LOS MATERIALES DEL O-RING

1= RECOMENDABLE 2= SATISFACTORIO 3= POBRE 4= NO RECOMENDABLE

Chemical / Media	Perfluoro-elastomer	Viton ETP	Aflas TFE/P	Viton FKM	EPDM P.C.	Buna-N NBR	Silicone	Fluoro-silicone	
Hydrocyanic Acid		1	1	1	1	1	2	3	2
Hydrofluoric Acid (49%)		1	1	-	1	4	4	4	4
Hydrofluoric Acid, Anhydrous		1	1	-	1	3	4	4	4
Hydrofluoric Acid, Conc. (Hot)		1	3	-	3	4	4	4	4
Hydrofluosilicic Acid		1	1	1	1	1	2	4	4
Hydrogen		1	1	-	1	1	1	3	3
Hydrogen Bromide, Anhydrous		1	-	-	-	-	-	-	-
Hydrogen Chloride, Anhydrous		1	1	1	1	1	4	-	-
Hydrogen Fluoride, Anhydrous		2	4	-	4	2	-	4	-
Hydrogen Iodide, Anhydrous		1	-	-	-	-	-	-	-
Hydrogen Peroxide (36%)		1	1	1	1	1	2	2	2
Hydrogen Selenide		1	-	-	-	-	-	-	-
Hydrogen Sulfide		1	4	1	4	1	1	3	3
Olive Oil		1	1	1	1	2	1	3	1
Orthochloro Ethyl Benzene		1	1	4	1	4	4	4	2
Oxalic Acid		1	1	1	1	1	2	2	1
Oxygen, Gas (Hot)		1	3	4	3	4	4	2	1
Oxygen, Liquid		2	4	4	4	4	4	-	-
Ozonated Deionized Water		1	2	-	1	2	-	-	-
Ozone		1	1	1	1	1	4	1	1

TABLA A.2 DE VALORES DE TORSIÓN (par) DE LOS TORNILLOS DE CASQUETE

DIA. del Tornillo Casquete y Resistcia. Límite Tensión (PSI)									
Tamaño Cuerpo Tornill o Casquete (pulg.)- (Filete)	Hasta 1/2—69.000 PSI Hasta 3/4—64.000 PSI Hasta 1—55.000 PSI			Hasta 3/4—120.000 PSI Hasta 1—115.000 PSI			150.000 PSI		
	Número de rado SAE 1 o 2			Número de rado SAE 5			Número de rado SAE 8		
	Torsión (1) Pie-Libra (N-m)			Torsión (1) Pie-Libra (N-m)			Torsión (1) Pie-Libra (N-m)		
	Seco	Aceitado	Enchapado	Seco	Aceitado	Enchapado	Seco	Aceitado	Enchapado
1/4-20	5 (7)	4,5 (6)	4 (5)	8 (11)	7 (9)	6 (8)	12 (16)	11 (15)	10 (14)
-28	6 (8)	5,4 (7)	4,8 (6)	10 (14)	9 (12)	8 (11)	14 (19)	13 (18)	11(15)
5/16 -18	11(15)	10 (14)	9 (12)	17 (23)	15 (20)	14 (19)	24 (33)	22 (30)	19 (26)
- 24	13 (18)	12 (16)	10 (14)	19 (26)	17 (23)	15 (20)	27 (37)	24 (33)	22 (30)
3/8 - 16	18 (24)	16 (22)	14 (19)	31 (42)	28 (38)	25 (34)	44 (60)	40 (54)	35 (47)
- 24	20 (27)	18 (24)	16 (22)	35 (47)	32 (43)	28 (38)	49 (66)	44 (60)	39 (53)
7/16 -14	28 (38)	25 (34)	22 (30)	49 (66)	44 (60)	39 (53)	70 (95)	63 (85)	56 (76)
- 20	30 (41)	27 (37)	24 (33)	55 (75)	50 (68)	44 (60)	78 (106)	70 (95)	62 (84)
1/2-13	39 (53)	35 (47)	31 (42)	75 (102)	68 (92)	60 (81)	105(142)	95 (129)	84 (114)
-20	41 (56)	37 (50)	33 (45)	85 (115)	77 (104)	68 (92)	120 (163)	108(146)	96 (130)
9/16-12	51 (69)	46 (62)	41 (56)	110 149)	99 (134)	88 (119)	155 (210)	140(190)	124(168)
- 18	55 (75)	50 (68)	44 (60)	120 163)	108(146)	96 (130)	170 (230)	153(207)	136(184)
5/8-11	83 (113)	75 (102)	66 (89)	150 203)	135 (183)	120(163)	210(285)	189(256)	168(228)
-18	95 (129)	86 (117)	76 (103)	170 (230)	153 (207)	136(184)	240 (325)	216(293)	192 260)
3/4-10	105 142)	95 (130)	84 (114)	270 (366)	243 (329)	216(293)	375 (508)	338(458)	300 407)
- 16	115 156)	104(141)	92 (125)	295(400)	266 (361)	236(320)	420 (569)	378(513)	336 456)
7/8 -9	160(217)	144(195)	128(174)	395(535)	356(483)	316(428)	605 (820)	545(739)	484 656)
- 14	175(237)	158(214)	140(190)	435 (590)	392 (531)	348(472)	675(915)	608(824)	540(732)
1 -8	235(319)	212(287)	188(255)	590 (800)	531(720)	472(640)	910(1234)	819(1110)	728(987)
- 14	250(339)	225(305)	200(271)	660(895)	594 (805)	528(716)	990(1342)	891(1208)	792(1074)

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

EG & G services, "Fuel cell handbook" 5^a ed. U. S., Department of energy office of fossil energy, 2000, 352 p.

"technology to transform our future". Fuel cells in transportation.7^a ed U. S. Departmen of energy., Energy Efficiency and renewable energy, 2000 16 p.

THOMAS, Sharon, " Fuel cells Green power". U. S. Departmen of energy., Office of advanced automotive technologies, 1998 36 p.

" Red de pilas de combustible del CSIC Reunión de lanzamiento conferencias inaugurales". España. Ministerio de ciencia y tecnología, 2002 119 p.

WIXSON, James R., "Funtion analysis and descomposistion using function analysis system technique" , Lockheed-Martin Idaho Technologies Company, Inc. 1987. 6p.

ALCAIDE, Marzal Jorge, "Diseño de producto métodos y técnicas" México, Universidad Politécnica de Valencia, ed. Alfaomega, 2004, 378 p.

ALCAIDE, Marzal Jorge, "Diseño de producto métodos y técnicas" México, Universidad Politécnica de Valencia, ed. Alfaomega, 2004, 378 p.

TESIS

AGNES PAULUS, Ursula, "Electrocatalysis for polymer electrolyte fuel cells: Metal alloys and model systems" Germany, 2002. 222 p. Thesys for the Degree of Doctor of Natural Sciences University of Ulm, Swiss Federal Institute of Technology Zurich

MENNOLA, Toumas, "Design and experimental characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells" Germany, 2000, 92 p. Thesys for degree of licenciante of technology of Helsinki university of technology, Department of engineering physics and methematics.

MENNOLA, Toumas, "Mass transport in polymer electrolyte membrane fuel cells using natural convection for air supply" Germany, 2004, 63 p. Thesys for degree of doctor of science in technology of technology of Helsinki university of technology, Department of engineering physics and methematics.

RAMIREZ, Garibay Héctor, "Conversión de un torno convencional en un torno gobernado por un control numérico" . México, 2003. 133 p. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica UNAM, Facultad de ingeniería, División de Estudios de Posgrado.

LENZ, Tiemann Alberto H., "Diseño de sistema para la elaboración de esferas para reforestación" . México, 2003. 171 p. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica UNAM, Facultad de Ingeniería Mecánica, División de Estudios de Posgrado.

CARBAJAL, Suárez Margarito, "Diseño de una herramienta para el manejo de combustible nuclear" . México, 2002. 100 p. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado.

ALVAREZ, Calderón de la Barca Gabriel, "Rediseño de una herramienta para optimizar el desplazamiento de fluidos en medios porosos utilizando la técnica de dinámica de fluidos computacionales" . México, 2004. 106 p. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado.

BÜERHEND, Orozco Rodrigo, "Diseño de un sistema tomográfico de capacitancia" México, 2001. 77 p. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica UNAM, Facultad de Ingeniería.

KARG, Barroso Martín, "Diseño y construcción de una maquina cazalladora de ladrillos" México, 1993. 105 p. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica UNAM, Facultad de Ingeniería.

ORMAZÁBAL Sánchez, Gaizka, "El IDS: Un Nuevo sistema integrado de toma de decisiones para la gestión de proyectos constructivos". España, 2002. 270 p. UPC, Instituto Ingeniería de la Construcción.

REVISTAS

SOLORZA, Feria Omar, "Mensaje del presidente de la sociedad mexicana del hidrógeno". El boletín del hidrógeno. México, V 1, No. 1. Jul./Sep. 2002

CANO, Castillo Ulises, "Las tecnologías del hidrógeno suenan cada vez más en todos los sectores mexicanos; a pesar de generalmente silenciosas". El boletín del hidrógeno. México, V 2, No 2. Oct./Dic. 2002

CANO, Castillo Ulises, "Las celdas de combustible: Verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica". Boletín IIE. México, V 23, No 5. Sep./ Oct. 1999

CANO, Castillo Ulises, "Infraestructura de uso de hidrógeno y materiales para celdas de combustible: clave para su pronto uso". Boletín IIE. México, V 24, No 4. Julio./ Agosto 2000

RUELAS, Roberto, "Celdas de combustible". Boletín En contacto. México, V 5, No 54. Octubre 2002

RUELAS, Roberto, "Celdas de combustible". Boletín En contacto. México, V 5, No 55. Noviembre 2002

PYLE, Walt, "Making electricity with hydrogen". Home Power. U. S. , No 35 June/July 1993

ELLIOTT, Larry, "Homebrew fuel cell & hydrogen electrolyzer". Home Power. U. S. No 85 October/ November 2001

O´ HAYRE, Ryan, "Lateral ionic conduction in planar array fuel cells". Journal of The electrochemical society. U. S. February 28 2003

MÉRIDA, W. R., "Non-planar architecture for proton exchange membrane fuel cells". Journal of power sources. Canadá. 10 april 2001

FIERRO, J. L. G., "Pilas de combustible". Energética XXI. España. Diciembre 2002

BÜHL, Gisela, "Tecnologías con futuro: Pilas de combustible la revolución silenciosa". Energética XXI. España. Julio/Agosto 2001

INTERNET

ADTS Asociación para la divulgación de tecnologías sostenibles, " Todo Lo que es preciso conocer de las Células de combustible" España

<http://www.adts.info/hidrogen/infohidrogen.pdf> 30 de Octubre 2004,

Comisión nacional para el ahorro de energía, "Ficha técnica: Celdas de combustible aplicadas al transporte" México

<http://www.conae.gob.mx/work/secciones/466/imagenes/celdas.pdf> 10 de Febrero 2004

CORTI, Horacio, "Hidrógeno y la energía del futuro", Argentina

hrcorti@cnea.gov.ar

www.gsm-clientes.com.ar/ancefn/hidrogeno/Corti.pdf 29 de Octubre 2004

BENNETTO, Peter, "Bug power" England

<http://www.ncbe.reading.ac.uk/NCBE/PROTOCOLS/PRACBIOTECH/PDF/fuelcell.pdf> 29 de Octubre 2004

FASOLI, Héctor J, "Hidrógeno y la energía del futuro pilas de combustión PEM hidrógeno-aire", Argentina

<http://www.gsm-clientes.com.ar/ancefn/hidrogeno/Fasoli.pdf> 29 de Octubre 2004

<http://www.appice.es/nuevaweb/esp/2/1.htm> 29 de Octubre 2004

<http://www.ballard.com/htm> 29 de Octubre 2004

<http://www.eco2site.com> 29 de Octubre 2004

http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2003/18mar_fuelcell.htm 29 de Octubre 2004

<http://www.howstuffworks.com/fuel-cell.htm> 29 de Octubre 2004

<http://www.humboldt.edu/~serc/spanish/htm> 29 de Octubre 2004

http://www.ford.cl/outfitters/reportaje_39.html 29 de Octubre 2004

<http://www.energuia.com/es/indice2.aspx?Categoria=24&Subcategoria=26> 29 de Octubre 2004

<http://embedded.deec.uc.pt/EU-savefuelcell/presentations/indexprescombustel.html#presentFC1> 29 de Octubre 2004

http://www.worldwide.fuelcells.org/sp_base.cgim 29 de Octubre 2004

<http://www.celulaacombustivel.com.br/cac/componentes/introcomp.htm> 29 de Octubre 2004

[http://www.geocities.com/pato_donald_2000/fuel_cell/#Tipos de Celdas de](http://www.geocities.com/pato_donald_2000/fuel_cell/#Tipos_de_Celdas_de) 29 de Octubre 2004

<http://www.HidrogenoyCélulasdeCombustible.htm> 29 de Octubre 2004

<http://www.propiedadesdehidrogenoyceldasdecombustible.htm> 29 de Octubre 2004

http://www.hidrotec-fuelcell.com.ar/index_esp.htm 29 de Octubre 2004

<http://www.udomi.de/fuelcell/fuelcell-basics.html> 11 de Noviembre 2004

http://www.hynet.info/hydrogen_e/index00.html 11 de Noviembre 2004

http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/channel.html 29 de Octubre 2004

<http://www.iie.org.mx/> 29 de Octubre 2004

<http://www2.ing.puc.cl/~iing/ed433/anales/celdasCombustible.htm> 29 de Octubre 2004

<http://www.members.tripod.com/~roteng/art4.htm> 29 de Octubre 2004

<http://www.generaciondistribuida.com> 29 de Octubre 2004

<http://www.monografias.com/trabajos10/pico/pico.shtml> 29 de Octubre 2004

<http://www.cienciateca.com/fuelcells.html> 29 de Octubre 2004

http://www.amerlis.pt/fuel_cell/fuelcell.htm 29 de Octubre 2004

<http://usuarios.tiscali.es/casteasu/pilas.htm> 29 de Octubre 2004

<http://www.csic.es/redes/pilas/principal.html> 29 de Octubre 200

http://www.ilo.org/public/spanish/region/ampro/cinterfor/temas/complab/banco/id_nor/guia_a.pdf 24 de Enero 2005

<http://www.ilo.org/public/spanish/region/ampro/cinterfor/temas/complab/xxxx/esp/1>
24 de Enero 2005

<http://www.intelligent-systems.com.ar/intsys/valueAnaSp.htm> 14 de Febrero 2005

<http://www.ilo.org/public/spanish/region/ampro/cinterfor/temas/complab/xxxx/esp/vii>
[i.htm](#) 14 de Febrero 2005-08-01

http://www2.uah.es/estudios_de_organizacion/temas_organizacion/org_praxis/org
[aniz_creacion_valor/analisis_funciones_en_av.htm](#) 26 de Enero 2005